

**ELEMENTS DE COMMANDE
AUTOMATIQUE
D'EXPERIENCES EN PHYSIQUE**

THESE

présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès Sciences, mention physique

par

Marinette SABEV

de

Trélex (VD)

THESE No 1685

GENEVE

Atelier d'impression de la Section de Physique

1974

**ELEMENTS DE COMMANDE
AUTOMATIQUE
D'EXPERIENCES EN PHYSIQUE**

THESE

présentée à la Faculté des Sciences

de l'Université de Genève

pour obtenir le grade de docteur ès Sciences, mention physique

par

Marinette SABEV

de

Trélex (VD)

THESE No 1685

GENEVE

Atelier d'impression de la Section de Physique

1974

La faculté des sciences, sur le préavis du professeur ordinaire D. MAEDER, directeur de thèse et d'une Commission composée du professeur ordinaire B. LEVRAT (centre interfacultaire de calcul électronique) et du professeur extraordinaire M. MARTIN (département de physique nucléaire et corpusculaire), autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 7 novembre 1974

Le Doyen:

Thèse No. 1685

Jean MULLER



REMERCIEMENTS

Que le professeur D. Maeder trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour m'avoir permis de préparer cette thèse et en avoir assumé la direction avec bienveillance.

Je remercie vivement le groupe du professeur M. Martin de m'avoir permis de partager ordinateur et matériel au sein de leur expérience au CERN et des nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je remercie les professeurs B. Levrat et M. Martin d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

Je remercie également le groupe technique du département de physique nucléaire et corpusculaire qui a assuré la construction d'un grand nombre d'appareils, ainsi que Madame Y. Gächter qui a dactylographié le manuscrit.

Ce travail a été financé en partie par le Fonds national suisse de la recherche scientifique.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. Introduction	1
2. Les fonctions télécommandées	
2.1 Introduction	4
2.2 Circuit de décodage CAMAC standard	5
2.3 Ligne de retard	
2.3.1 Ligne de retard CAMAC	9
2.3.2 Ligne de retard non CAMAC	9
2.4 Atténuateur	10
2.5 Circuit de coïncidence	10
2.6 Alimentation haute tension	11
2.7 Système à diodes photo-émissives	13
3. Les conditions de contrôle	
3.1 Les divers modes de contrôle	16
3.2 Contrôle manuel	
3.2.1 Contrôleur manuel de branche CAMAC	17
3.2.2 Unité numérique	20
3.3 Contrôle par ordinateur	
3.3.1 Configuration et performance de l'ensemble IBM 1800	26
3.3.2 Mode d'utilisation	28
3.3.3 Sous-routines CAMAC	29
3.4 Contrôle mixte manuel/ordinateur	31
4. Les méthodes de programmation	
4.1 Conception modulaire des programmes	33
4.2 Conditions imposées par	
4.2.1 l'utilisateur	34
4.2.2 la structure de l'expérience	35
4.2.3 le type de contrôle à effectuer	35
4.2.4 le programmeur	36
4.3 Structure générale des programmes	36
4.4 Exemple d'une structure	
4.4.1 Programme principal (PP)	41

4.4.2	Les programmes d'exécution (PE)	42
4.4.3	Les sous-programmes de base	43
4.4.4	Les sous-programmes spécifiques	43
4.4.5	Exemple	44
4.5	Choix des algorithmes	
4.5.1	Méthode triviale	44
4.5.2	Algorithme particulier	44
5.	Application à la recherche du point de fonctionnement des photomultiplicateurs	
5.1	Le détecteur à scintillation	
5.1.1	Principe	45
5.1.2	Gain du photomultiplicateur	46
5.2	La caractéristique en "plateau" du photomultiplicateur	
5.2.1	Traitement du signal d'anode	48
5.2.2	Caractéristique mesurée à l'aide de diodes photo-émissives	49
5.2.3	Choix du point de fonctionnement	51
5.3	Conditions de mesures	
5.3.1	Programme	52
5.3.2	Mesures avec ou sans déduction du bruit	54
5.3.3	Nombre de points de mesure	57
5.3.4	Temps de mesure	62
6.	Application à différents éléments de commande	
6.1	Etalonnage des photomultiplicateurs à l'aide des diodes photo-émissives	
6.1.1	Energie lumineuse émise par la diode	67
6.1.2	Méthode de mesure	68
6.1.3	Résultats obtenus	70
6.2	Réglage du retard pour assurer la coïncidence entre deux voies de mesure	
6.2.1	Présentation du problème	74
6.2.2	Programme	77
6.2.3	Résultats obtenus	77

III

6.3	Mise en évidence du temps de montée du signal à la sortie du photomultiplicateur	
6.3.1	Effet du temps de montée du signal de photomultiplicateur	77
6.3.2	Mise en évidence	79
7.	Application à une expérience: mesure de coïncidence entre les rayons γ d'annihilation des positrons d'une source de ^{22}Na	
7.1	Désintégration du ^{22}Na	82
7.2	Coïncidence $\gamma\gamma$	82
7.3	Description du montage utilisé	87
7.4	Choix du point de fonctionnement des photomultiplicateurs	
7.4.1	Efficacité des scintillateurs	90
7.4.2	Choix des hautes tensions	92
7.5	Mesure de la coïncidence $N_c(\theta)$	98
7.6	Résultats obtenus	102
7.7	Discussion de la méthode	104
8.	Conclusion	107
Annexe:	Le système CAMAC: résumé des notions nécessaires à la compréhension du texte	109



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545931_0046

1. INTRODUCTION

Le développement considérable des ordinateurs ces dix dernières années, leur fiabilité ainsi que la diversification de leurs applications d'une part, et le grand effort consenti pour la recherche en physique des hautes énergies d'autre part, ont contribué à l'énorme accroissement des dimensions des machines de production de particules, des dispositifs expérimentaux pour leur détection et du volume d'information à traiter.

Le traitement des données demande des puissances de calcul accrues et par conséquent un système centralisé, avec cependant accès et distribution rapide. L'exploitation des accélérateurs, la conduite des expériences et la prise des données, par contre, sont le fait d'ordinateurs plus spécifiques disséminés dans les zones d'utilisation.

Il ne fait nul doute que l'on ne peut plus envisager l'exploitation de grands accélérateurs, tels que le SPS du CERN, sans l'aide d'un ordinateur, qui devient alors partie intégrante du système de commande. Il en va de même pour bon nombre d'expériences de grande dimension et à long terme (p. ex. les projets Omega et SFM du CERN⁽¹⁾). Pratiquement toutes les expériences électroniques sont maintenant pourvues d'un ordinateur en ligne; cependant pour les expériences de moindre dimension dont la configuration peut varier dans le temps, le rôle de l'ordinateur est, à part quelques travaux de contrôle, essentiellement réservé à l'acquisition des données.

Il nous semble cependant intéressant et souhaitable de pousser le contrôle et l'optimisation aux expériences modestes et de moindre durée, d'autant plus que l'apparition du système CAMAC⁽²⁾ pour le traitement des informations en temps réel a mis à disposition des expérimentateurs tout un système d'instrumentation modulaire pour la communication avec l'ordinateur.

S'il n'est pas opportun de vouloir faire un programme spécifique pour une expérience bien définie, il est cependant possible de commander et optimiser des éléments typiques d'expérience à l'aide de programmes séparés, la gestion des différents programmes étant laissée au physicien, au fur et à mesure de ses besoins. Plutôt qu'une substitution de l'ordinateur au physicien pour le contrôle de son expérience, il s'agit d'offrir à ce dernier des moyens beaucoup plus sophistiqués pour le réglage des différents composants de l'expérience, l'optimisation globale restant toujours le fait de l'expérimentateur.

C'est dans ce sens que nous avons choisi de développer quelques solutions de contrôle pour des éléments typiques d'expérience, en nous basant sur une conception modulaire de la commande déjà au niveau de la programmation.

Pour des raisons essentiellement de matériel et d'accès aux zones d'expériences, nous avons dû nous limiter dans notre choix à des éléments simples tels que le réglage automatique du point de fonctionnement des photomultiplicateurs et celui du retard entre différentes voies de

comptage d'événements. Diverses applications de commande automatique sont données dont une mesure de coïncidence entre les rayons γ d'annihilation des positrons d'une source ^{22}Na .

Enfin, une fois démontré l'utilité et la facilité de mise en oeuvre de la télécommande, ainsi que son universalité, nous espérons que notre travail incitera les expérimentateurs à l'appliquer à de nombreux autres éléments comme le réglage des faisceaux, celui des chambres à fils, etc....

2. LES FONCTIONS TELECOMMANDEES

2.1. Introduction

L'instrumentation pour la mesure et la commande de processus est généralement fournie sous forme de tiroirs fonctionnels. La plus grande partie de l'appareillage électronique utilisé dans les expériences de physique des hautes énergies se trouve déjà selon les normes NIM⁽³⁾ et parmi celle-ci, une certaine partie a déjà été convertie au système CAMAC, en particulier, tout ce qui doit être lu par un ordinateur, comme par exemple les échelles de comptage. Il existe, en outre, des modules d'entrée et de sortie CAMAC (respectivement input et output registers) qui servent d'interface aux deux systèmes, ainsi que des circuits spécifiques développés directement en CAMAC.

Comme une grande part du travail du physicien lors du réglage d'une expérience consiste à ajuster les délais respectifs de diverses voies de mesure et à régler des seuils de discriminateurs, des tensions de photomultiplicateurs ou de chambres à étincelles, nous avons choisi d'adapter à la commande CAMAC les modules suivants⁽⁴⁾

- ligne de retard
- atténuateur
- coïncidence
- haute tension pour PM (ou chambre à fils)

Le reste du matériel utilisé pour nos essais étant standard NIM et CLR/A⁽⁵⁾ principalement.

D'autre part, nos travaux portant essentiellement sur le réglage optimum du point de fonctionnement de PM et celui de retards pour coïncidence, nous avons choisi un système utilisant les impulsions lumineuses de diodes "light-flashes" comme références pour pratiquer tous les réglages préalables et contrôles en cours d'expérience.

2.2. Circuit de décodage CAMAC standard

Pour pouvoir dialoguer avec le système CAMAC, les modules doivent reconnaître les commandes et les données qui les concernent. Pour cela nous avons développé un circuit de décodage CAMAC standard que nous avons appliqué à différents modules logiques classiques (voir résumé des normes CAMAC dans annexe A).

La fig. 2.1 et le tabl. 2.1 montrent respectivement le schéma bloc de ce circuit et la liste des fonctions décodées.

Tout module doit pouvoir être commandé soit manuellement, soit par la voie CAMAC avec protection éventuelle contre l'un ou l'autre mode. Ceci implique un accès aux commandes à partir du panneau frontal du module et par là entraîne parfois, en plus des fiches de connexion pour les signaux, à une prolifération de boutons poussoirs et de lampes d'affichage. La largeur du module n'est plus alors imposée par son contenu, mais par celle du panneau avant, d'où une mauvaise utilisation des places CAMAC. Dans ce but, nous avons limité à 8 bits la plage des données, ce qui nous a paru suffisant pour de nombreux cas; l'extension à un nombre de bits plus élevé ne posant pas de problème.

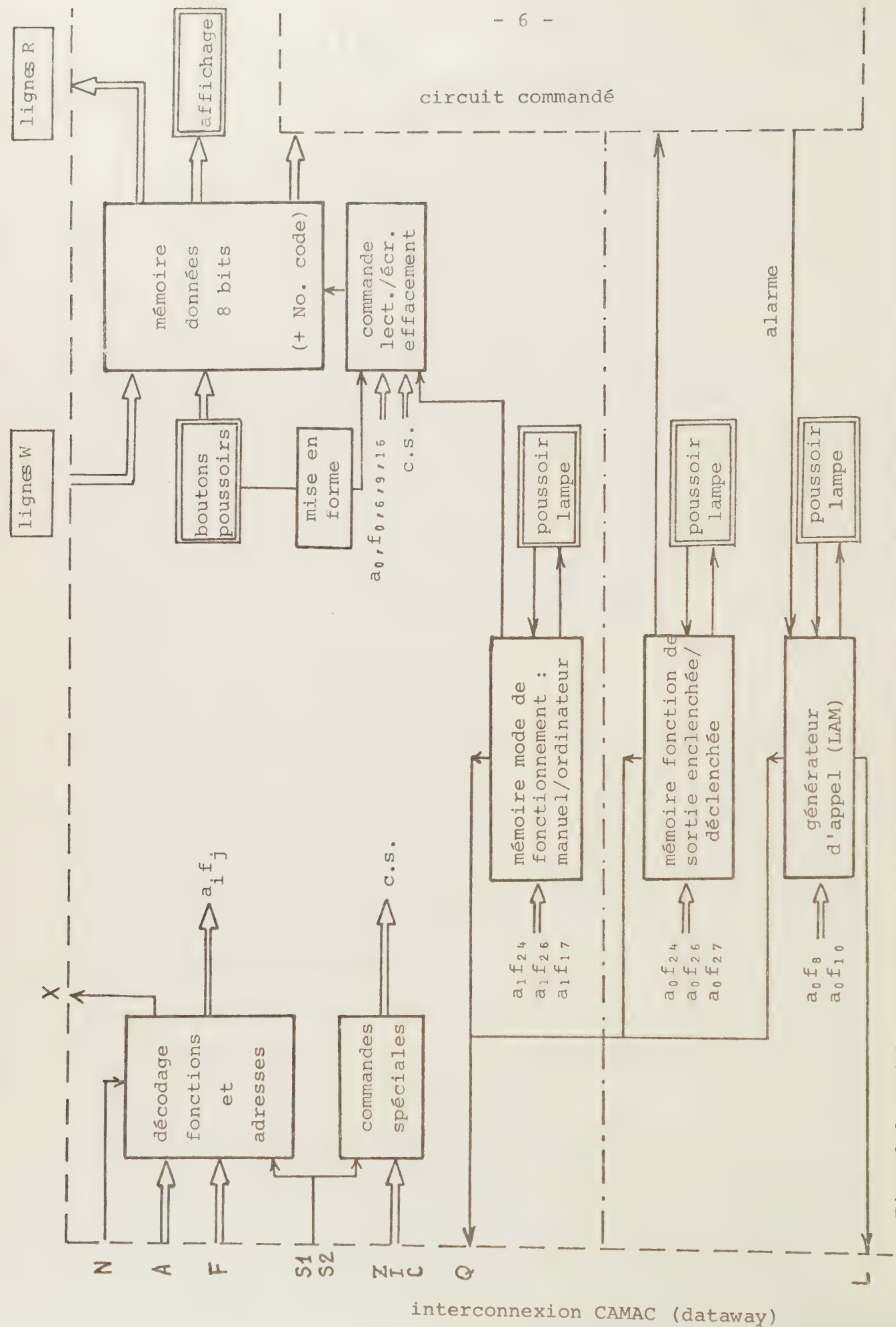


Fig. 2.1. Schéma-bloc du circuit de décodage CAMAC. La partie située au-dessous de la ligne en trait mixte ne concerne pas la commande des circuits de fonctions logiques.

A	F	Action
O	0	lecture des données sur les lignes R
	6	lecture du code du module sur les lignes R
	8	test de l'appel (LAM)
	9	remise à zéro de la mémoire de données
	10	remise à zéro de l'appel
	16	écriture dans mémoire des données (présentes) sur lignes W
	24	mise en service du module
	26	mise hors service du module
	27	test si module en service
1	6	lecture du code du module sur les lignes R
	24	verrouillage de la commande manuelle
	26	mise en service de la commande manuelle
	27	test si la commande manuelle est verrouillée
S1, S2 : signaux de synchronisation Q, X : réponses L : appel du module Z, C, I : commandes générales pour tous les modules (initialisation, remise à zéro, inhibit.)		

Tableau 2.1. Fonctions et commandes utilisées dans le circuit standard

Comme il est indiqué dans le schéma et le tableau de fonctions, nous avons utilisé la fonction F6 non standard CAMAC, mais recommandée par le CERN⁽⁶⁾ pour la lecture du code (ou caractéristique) du module.

Le numéro de code apparaît donc sur les lignes R en réponse à la commande N.F6 (quelle que soit la sous-adresse A).

Nous avons choisi la forme suivante pour le codage de nos modules :

R16	R15	R11	R10	R5	R4	R1
-----	-----	-----	-----	----	----	----

R1 - 4 = nombre de mots (nombre de sous-adresses décodées dans le module avec 0000 = 16 mots)

R5 - 10 = nombre caractéristique pour chaque type de module

R11-15 $\neq$ 0 pour les modules avec base = 1 et sans unité

R16 = 1 pour les modules développés à l'Université de Genève

L'utilité de cette fonction apparaît surtout lorsque les données présentent des particularités de codage ; en particulier, bien que le système binaire soit utilisé, lorsque le poids du premier bit est $\neq$ 1. Une application est décrite au § 3.1.2..

2.3. Ligne de retard

2.3.1. Ligne de retard CAMAC (type LPNEUG* 730)

Nous avons utilisé notre circuit de décodage standard pour commander de petits relais, lesquels remplacent les commutateurs manuels d'une ligne de retard traditionnelle.

Le premier bit de donnée correspondant à un retard de 0.5 nsec et la progression étant binaire, cette ligne permet de varier le délai de 0.5 à 63.5 nsec avec un pas de 0.5 nsec. Elle est logée dans un module CAMAC de 2 unités de largeur.

Les relais utilisés sont des double-commutateurs montés sur circuit imprimé de façon à limiter les réflexions en tension à 5% environ. Le câble utilisé est du type 50 Ω avec ϕ 5mm, pour les longueurs correspondant à > 8 ns ; pour les longueurs inférieures, nous avons choisi du RG 174/u, ϕ 2.5mm, pour limiter l'encombrement. L'atténuation est alors de 6dB/64 ns pour des impulsions de 2 ns à mi-hauteur et de 3dB/64 nsec pour celles de 10 ns. à mi-hauteur.

2.3.2. Ligne de retard non CAMAC

Il existe sur le marché des lignes de retard à relais coaxiaux qui peuvent être commandées manuellement à l'aide d'un sélecteur numérique ou électroniquement par 8 bits binaires (ou un mot de 16 bits pour 2 lignes) de niveau TTL. Un tel module peut être relié au CAMAC via un "output register". Dans la suite de notre travail, nous avons en effet utilisé une ligne de ce type (BORER : Twin delay line type 701 modifiées pour commande par niveaux TTL).

* (LPNEUG = Laboratoire de physique nucléaire expérimentale de l'Université de Genève).

Ces lignes sont de bonne qualité avec des réflexions inférieures à 5% et une atténuation de l'ordre de 3dB, respectivement 6dB, au maximum de retard soit ~ 100 ns, pour des fréquences en régime sinusoïdal de 100MHz, respectivement 250MHz.

D'encombrement relativement important du fait de la qualité du câble utilisé et des relais coaxiaux, ce sont des modules avec alimentation incorporé, qui se montent directement sur le rack. La place CAMAC nécessaire correspond à $\frac{1}{4}$ de output register soit $\frac{1}{4}$ position CAMAC.

2.4. Atténuateur

Nous avons construit des atténuateurs CAMAC de la même manière que la ligne de retard CAMAC (cf. 2.3.1.). L'atténuateur varie de 0.25dB à 31.75dB par pas de 0.25dB. Bien que les atténuateurs utilisés ainsi que les relais soient de faible volume, un châssis de 2 unités de largeur a été nécessaire en raison de l'encombrement du panneau frontal comme cela a été mentionné au § 2.2.

2.5. Circuit de coïncidence

Dans de nombreux cas, le circuit de coïncidence n'a pas besoin d'être télécommandé, car le circuit qui génère le signal d'entrée possède un nombre de sorties suffisant pour permettre d'utiliser des voies différentes fixes.

Cependant, il peut être utile de disposer d'un circuit de coïncidence télécommandé, en particulier lorsque l'on veut utiliser

ce circuit comme aiguillage entre plusieurs signaux standardisés sur 50 Ω : par exemple un signal de mesure et un signal de test que l'on veut envoyer sur la même voie à des moments déterminés.

Il est très facile de combiner sur un même circuit imprimé la partie décodage CAMAC décrite au § 2.2. et la partie coïncidence déjà réalisée selon un autre standard. De cette manière, nous avons monté un circuit de 3 fois double-coïncidence dans un module CAMAC de une unité.

Une autre solution consiste à utiliser un module de coïncidence standard NIM auquel en général une très légère modification permet une commande via un connecteur arrière. Le standard mécanique permet de loger le module NIM dans une baie CAMAC et il reste une place suffisante pour câbler la partie décodage CAMAC sur l'adaptateur qui relie les connecteurs CAMAC et NIM.

2.6. Alimentation haute tension pour photomultiplicateur

Le module haute tension comportant l'oscillateur, le transformateur et la chaîne de condensateurs est logé dans la base du photomultiplicateur (type LPNEUG 720). Il est commandé par une tension de référence de -10 V à -20 V délivrée par un convertisseur HT (LPNEUG 725) logé dans une baie spéciale (NIM modifiée; contrôleur LPNEUG 727). Le convertisseur HT est à son tour commandé soit manuellement par un héliopot, soit par CAMAC via un convertisseur digital-analogique (DAC) (LPNEUG 745) de 8 bits. Alors que la commande manuelle permet une variation

continue de la tension, la commande automatique par CAMAC produit une quantification de la tension par sauts de 5.87 V entre 1500 V et 2994 V (respectivement des sauts de 11.54 V entre 3000 V et 6000 V pour alimenter, par exemple, des chambres à fils).

La lecture de la haute tension est réalisée par un voltmètre digital qui mesure la tension de commande à la sortie du convertisseur HT et la convertit en valeur de haute tension. De plus, un ampèremètre digital affiche le courant envoyé au module H.T. Une interface (LPNEUG 732B) permet de sélectionner le canal à lire ainsi que de transmettre les résultats au système CAMAC.

La figure 2.2 montre l'ensemble du système de haute tension télécommandé.

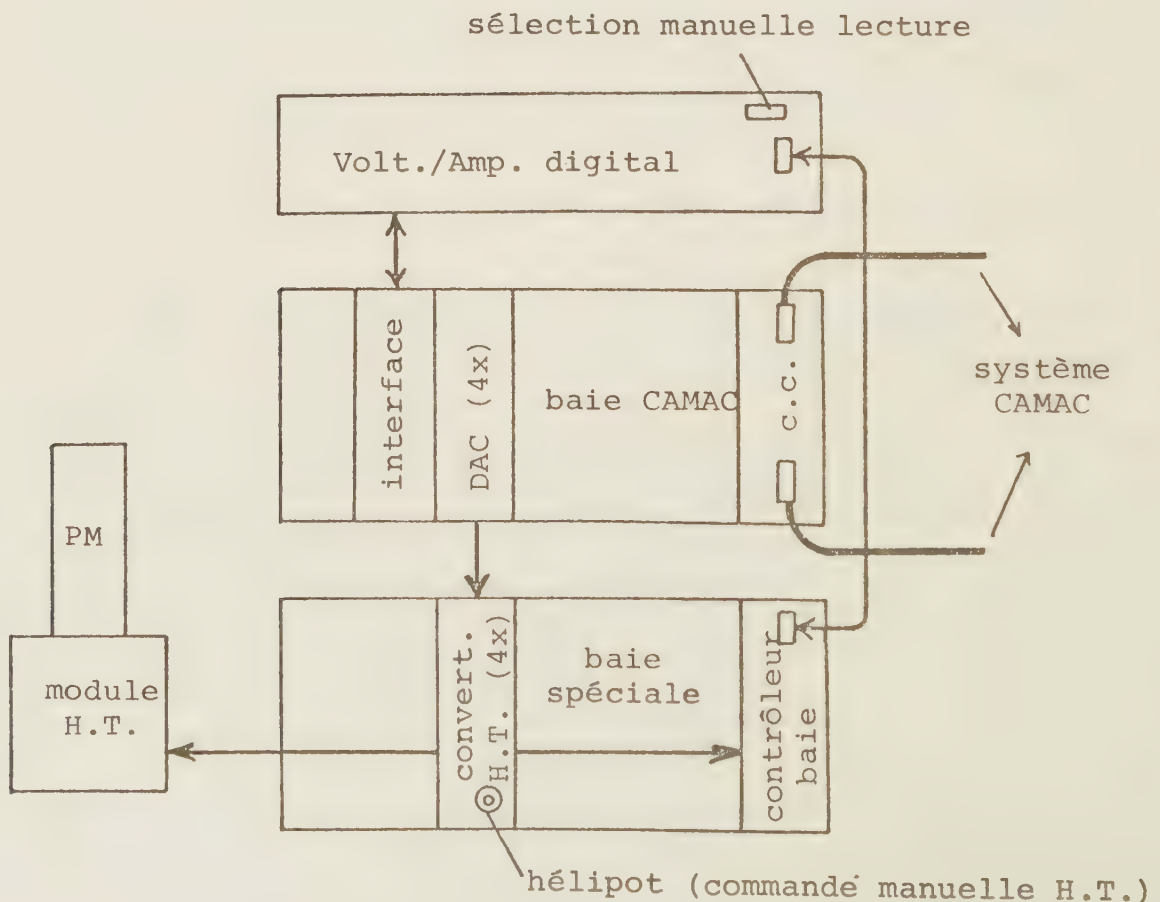


Fig. 2.2 Schéma de principe du système de commande de la haute tension.

2.7. Système à diodes photo-émissives

Les impulsions lumineuses produites par des particules dans un scintillateur sont simulées à l'aide de diodes photo-émissives commandées par un générateur d'impulsions adéquat. L'énergie lumineuse, l'instant et la durée de l'émission étant connus et contrôlés, il devient aisé d'ajuster, par exemple, le gain des photomultiplicateurs et les retards des différentes voies de mesure d'une expérience.

Pour cela, nous utilisons des diodes du type Ferranti XP21 dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- diode à jonction au GaP
- émission, en tension inverse, de lumière dont le spectre est compris essentiellement entre 5600Å et 7000Å avec un maximum pour 6150Å.
- intensité lumineuse : 2.8×10^{-6} lumens/mA
- seuil de tension inverse : 9V
- résistance dynamique 30 Ω
- temps de montée : 5ns
- temps de descente : 5ns

Elles se présentent sous la forme de petites perles de plastique transparent d'environ 1mm de diamètre et 1.6mm de long. Ces diodes ont été choisies pour leur spectre d'émission relativement proche du domaine de la sensibilité des photomultiplicateurs, pour leur grande rapidité ainsi que leurs faibles dimensions⁽⁷⁾. La diode est montée, comme le montre la fig. 2.3, au centre d'un disque de plexiglas de 40mm de diamètre et de 12mm d'épaisseur qui s'intercale dans le guide de lumière à environ

30mm de la photocathode du tube photomultiplicateur. La diode est placée dans un trou selon l'axe du guide, de façon à émettre le maximum de lumière en direction de la photocathode; une gorge en V de 2mm de profondeur permet le passage des fils de connexion. De la graisse optique assure la continuité de l'ensemble si bien que la perte de collection de lumière due à l'introduction de la diode reste $< 5\%$. Enfin, la diode est alimentée via une fiche "Lemo" 50Ω miniature fixée sur le support du scintillateur.

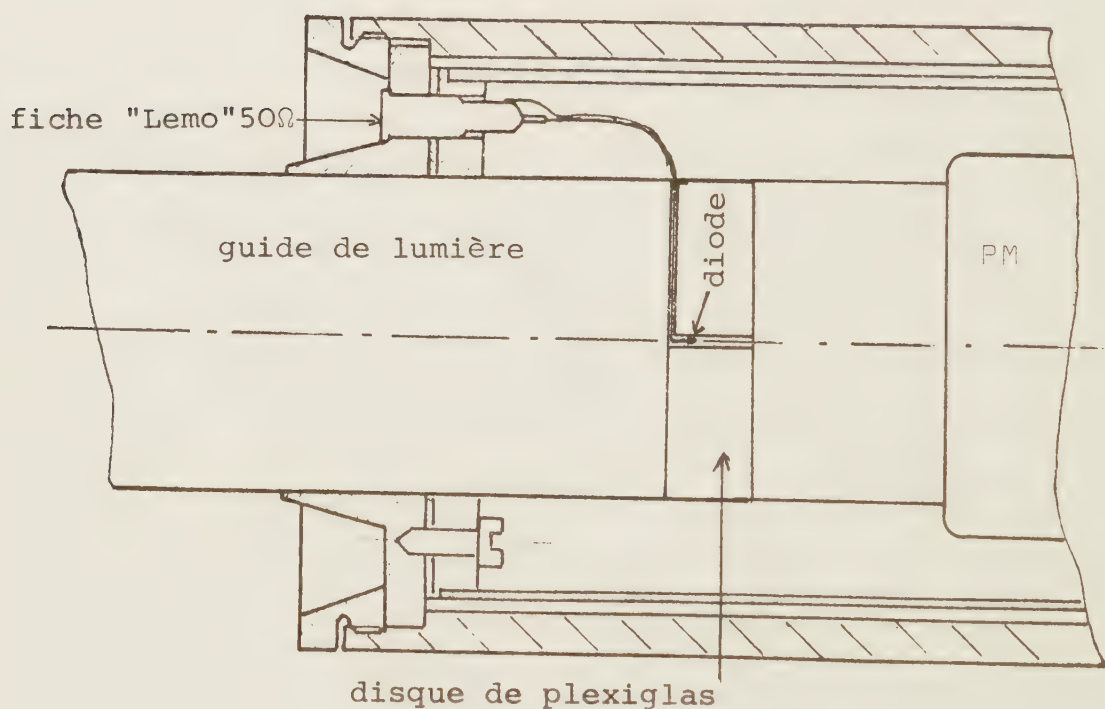


Fig. 2.3. Montage des diodes photo-émissives

D'autre part, nous avons utilisé un générateur d'impulsions ⁽⁷⁾ à transistors à avalanche (type RT 3333) commandé par des impulsions CLR/A et dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- 4 sorties synchrones
- amplitude maximum : 60 - 150V/75 Ω
- fluctuations en amplitude < 1%
- temps de montée (75V) : 1 à 1.5ns
- durée : ajustable de 3ns à toute valeur désirée par le choix d'un circuit RC ou par celui d'un câble en court-circuit
- fréquence de répétition max. : de l'ordre de 3kHz pour impulsions de courte durée
- fluctuation en temps entre 2 sorties, respectivement entre signal de déclenchement et sortie : ~ 0.4ns à mi-hauteur.

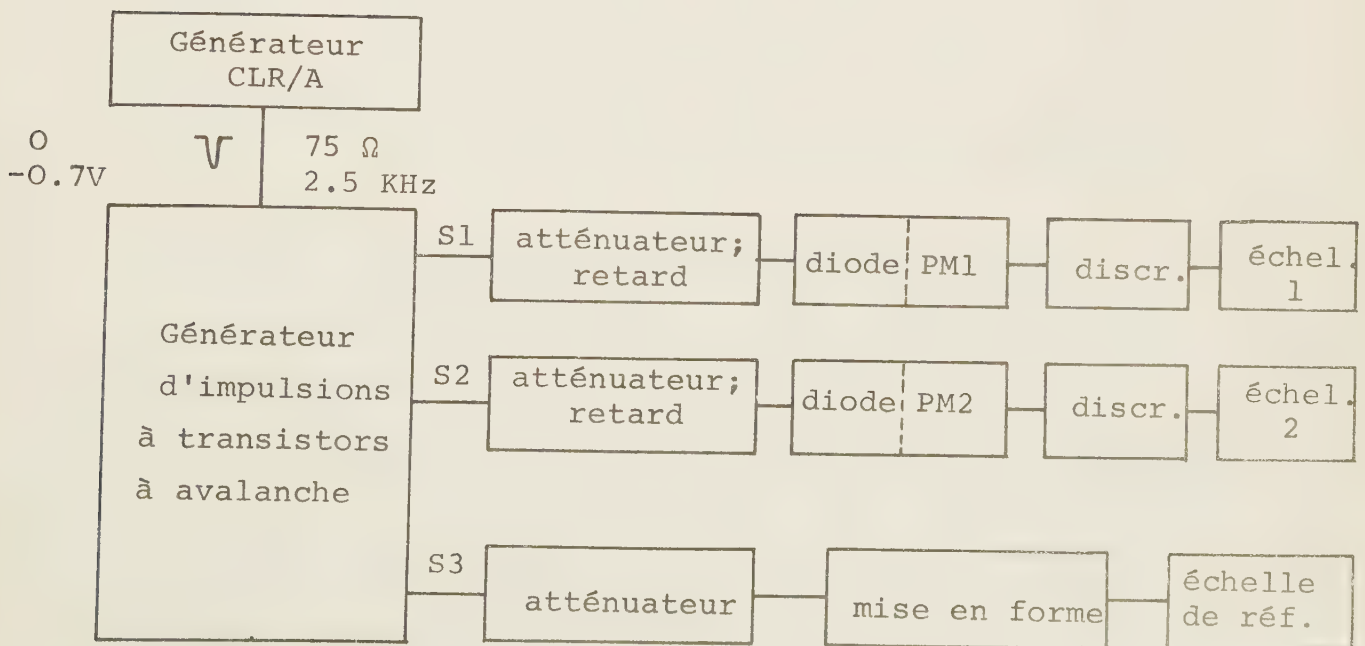


Fig. 2.4. Schéma-bloc du système de commande des diodes photo-émissoires.

3. LES CONDITIONS DE CONTRÔLE

3.1. Les divers modes de contrôle

Si des modules de différents standards peuvent être utilisés dans le cadre d'une expérience, tout ce qui doit être télécommandé par ordinateur sera normalement en CAMAC.

Une fois l'expérience en état de fonctionnement, elle est contrôlée à l'aide de l'ordinateur. Celui-ci gère le déroulement des programmes de commande ou d'acquisition avec intervention de l'utilisateur, au moyen d'un clavier ou de commutateurs, pour le choix des programmes, l'entrée de données ou de paramètres, et le choix d'options à l'intérieur des programmes.

Cependant, la mise au point des modules ainsi que la première approche de programmation doit se faire en laboratoire où l'on ne dispose pas toujours d'ordinateur pour ce genre de travail. Nous avons été amenés à développer deux types de contrôleurs manuels :

- le contrôleur manuel de branche CAMAC : qui permet le test complet en régime statique et dynamique de tout module CAMAC via une branche CAMAC ; il est utilisé essentiellement pour la mise au point des circuits.
- l'unité numérique : plus limitée dans ses fonctions mais qui permet une commande aisée également au niveau de la branche CAMAC en absence d'ordinateur.

Enfin, lorsque l'expérience est déjà reliée à l'ordinateur,

il apparaît très utile de disposer d'une unité manuelle en parallèle avec celui-ci pour le contrôle immédiat et facile du "hardware" à tout moment. En particulier, lorsqu'un programme se bloque, il est possible de vérifier l'état de toutes les commandes au niveau de la branche. Nous appelons ce mode : la commande mixte.

Les paragraphes suivants donnent une description des divers contrôleurs utilisés.

3.2. Contrôle manuel

3.2.1. Contrôleur manuel de branche CAMAC (type LPNEUG 733)

Cet appareil permet de commander, pour la tester, une branche CAMAC en décomposant les cycles, en travaillant cycle par cycle (ceci manuellement ou par un signal NIM externe), ou de manière continue avec répétition rapide de cycles. Il permet également de vérifier le fonctionnement d'une branche commandée par une autre unité ; dans ce cas, il se met à la place de l'unité de terminaison.

La figure 3.1. montre la disposition des commandes. Chaque ligne de commande ou de donnée est accessible par un commutateur et munie d'une lampe témoin. Deux valeurs d'adresses et de fonctions peuvent être présélectionnées pour deux cycles au choix ou en alternance.

La particularité de cette unité réside dans le découpage en phases successives des cycles CAMAC et dans l'affichage des conditions requises pour le passage de l'une à l'autre (voir fig. 3.2 et tab. 3.1), ce qui facilite beaucoup la

[illegible]

Fig. 3.1 Panneau frontal du contrôleur manuel de branche CAMAC

CONDITIONS

PHASES

ouverture de : BCR,BN,BA,BF,BG,BRW

BTA

"OU" des BTB adressés et présents

"ET" des BTB adressés

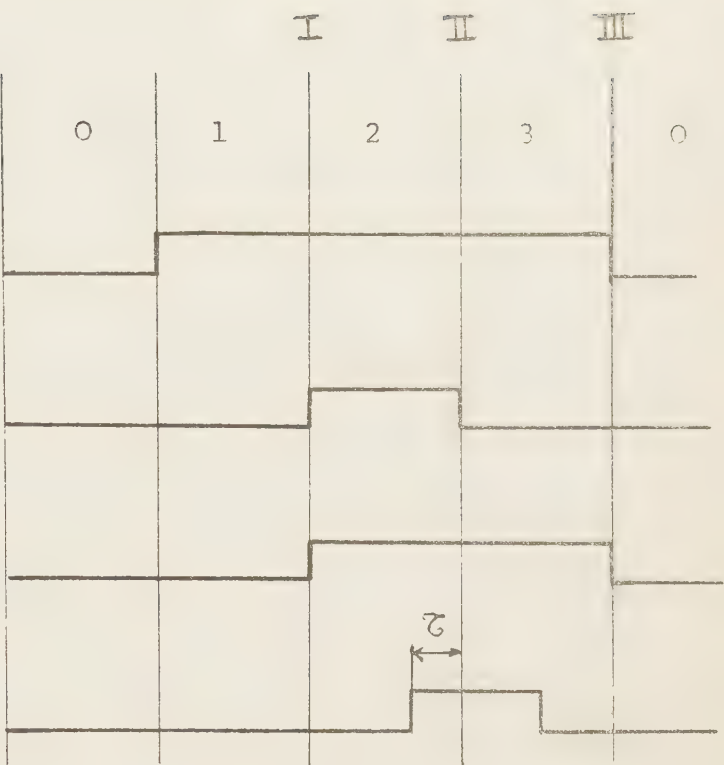


Fig. 3.2. Diagramme des phases

CONDITION	EXPRESSION LOGIQUE	SIGNIFICATION
I	$\sum_{i=1}^7 \overline{BTB}_i \cdot BCR_i$	au moins une baie adressée est présente
II	$(\Pi_i (BTB_i \cdot BCR_i)) + \tau$	tous les BTB des baies adressées sont à 1 depuis 300ns
III	$\Pi_i [(\overline{BTB}_i \cdot BCR_i) + (BTB_i \cdot BCR_i)]$	tous les BTB sont de nouveau à leur état initial

(Rappel : le signal BTB d'une baie absente = 1)

Tabl. 3.1. Définition des conditions

détection de pannes dans le fonctionnement d'un ensemble.

Pour l'utilisation en mode "MAN", le passage d'une phase à la suivante se fait à chaque commande de déclenchement (manuelle ou externe) ; pour les autres modes, la succession des phases a lieu automatiquement pour autant que les conditions correspondantes soient satisfaites. Si ce n'est pas le cas, le système se bloque dans cet état (une touche RESET permet de le remettre en phase 0).

Lorsqu'il est en régime "OFF", le contrôleur n'est plus qu'une terminaison. Mais en plus de l'état des lignes, les phases et les conditions sont affichées.

3.2.2. Unité numérique⁽⁸⁾ (type LPNEUG 660)

Cet appareil représente une approche toute différente du précédent en ceci qu'il n'est pas d'usage aussi universel ni complet, mais qu'il présente certaines facilités d'emploi comme un affichage décimal des données et des séquences de fonctions précâblées.

Cette unité commande également directement une branche CAMAC et permet une manipulation aisée et rapide du système CAMAC, avec des performances suffisantes dans la plupart des cas.

Elle se présente sous la forme d'une console comprenant 7 registres à 6 digits décimaux dont 3 affichés par des tubes Nixies, qui sont respectivement les registres du clavier (KR), des adresses (AR) et des données (DR), et 4 registres auxiliaires A,B,C et D. La communication entre

tous ces registres se fait à l'aide de commandes par boutons-poussoirs selon les flèches indiquées sur le panneau de commande (fig. 3.3). Un clavier décimal permet l'entrée de données dans le registre KR.

Pour toute opération à effectuer sur un module, on met d'abord son adresse complète (numéros de crate, de module et sous-adresse) dans le KR (soit par l'appel d'une adresse stockée en A,B,C ou D, soit en la composant sur le clavier). Le transfert de KR vers AR engendre automatiquement les fonctions de lecture du contenu du module adressé (affiché en DR avec virgule et unité ; plus affichage binaire sur lampe R) et de son état (lampes "enable" ou "disable"). Il est alors possible de modifier le contenu du module à l'aide du clavier et d'un transfert de KR vers DR, ainsi que de changer l'état de service (touches ENABLE DISABLE) ces deux dernières opérations étant automatiquement suivies, à titre de contrôle, d'une lecture du contenu et de l'état du module.

Le clavier permet l'entrée décimale des données, mais le système peut être mis en régime binaire au moyen de la touche BINARY ; dans ce cas, seul le bit de poids 1 du clavier est inscrit ; le nombre binaire s'affiche sur les lampes W1-W16 (éteintes lorsque l'on est en décimal) et le registre décimal (Nixies) est mis à zéro. D'une manière générale, les fonctions de lecture, d'écriture et de mise à zéro sont appliquées dans les modules aux registres du groupe 1 ; cependant les registres de second groupe peuvent

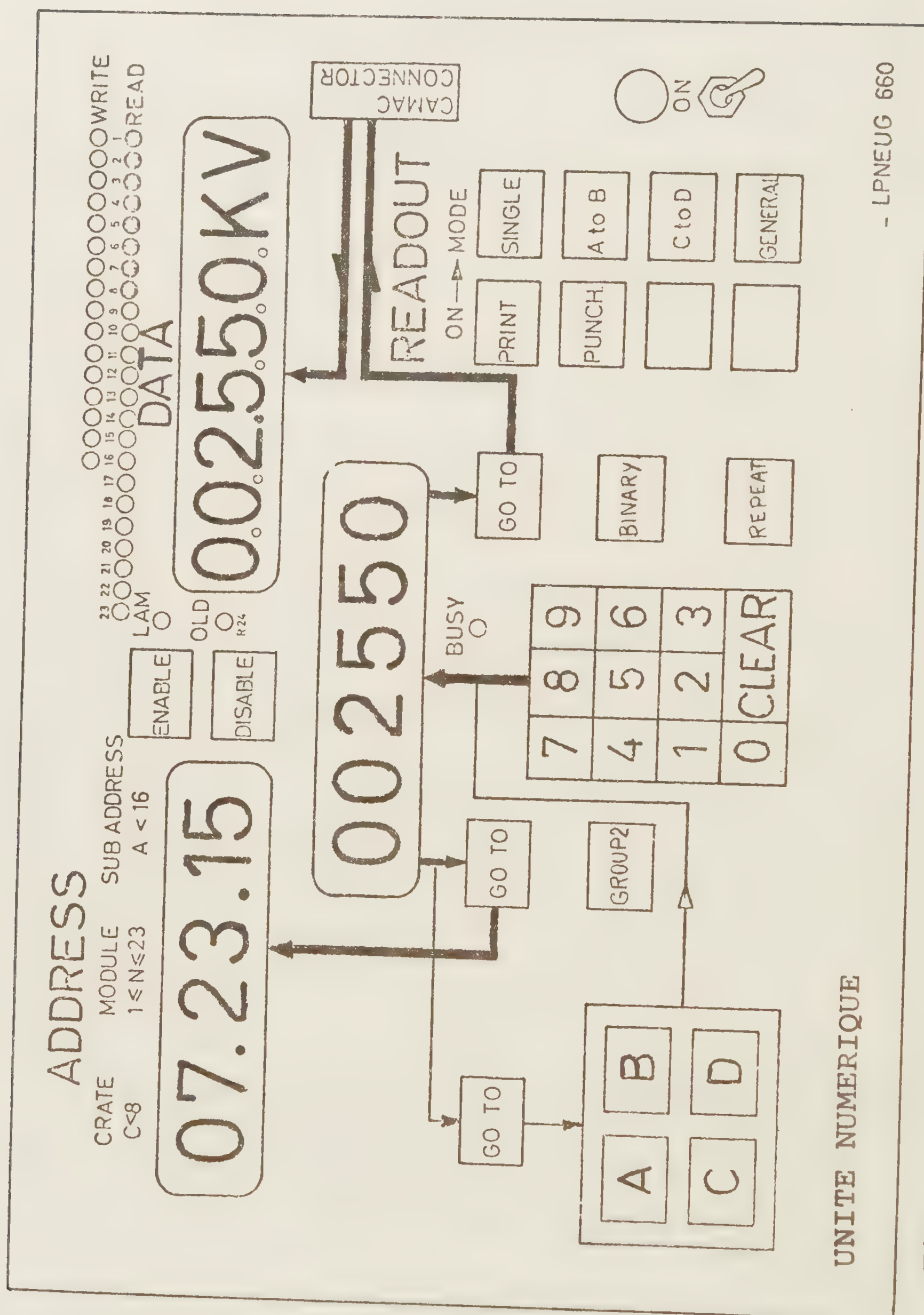


Fig. 3.3 Panneau frontal de l'Unité numérique

être atteints à condition d'enclencher tout d'abord la touche GROUP2. La touche CLEAR du clavier met bien sûr à zéro le contenu du KR, mais suivie d'un transfert vers le DR, elle réalise directement la fonction de mise à zéro du contenu du module adressé.

D'autre part, les modules fournissent des informations, sous forme binaire, qu'il faut décoder dans notre unité pour les afficher sur les Nixies. Dans certains cas (atténuateurs, lignes de retard, H.T., etc...), le premier bit peut avoir un poids $\neq 1$ (p. ex. 1M, 1k, 1u, 5, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$) dont le décodage doit tenir compte. Il en est de même pour les données que l'on envoie aux modules. Pour ce faire, le facteur de conversion est repéré, en même temps que la dimension (dB, sec, Volt, etc...) par la caractéristique du module qui est lue automatiquement avant toute lecture du contenu du module.

Touche	Séquence de fonctions
GO TO AR	F6, FO, F27
GO TO DR	F16, F6, FO, F27
CLEAR puis GO TO DR	F9, F6, FO, F27
ENABLE	F26, F27
DISABLE	F24, F27

Remarque : si GROUP2 est enclenchée les fonctions FO et F16 deviennent respectivement F1 et F17

Tableau 3.2 Séquences de fonctions

FONCTION	No.	réalisée à l'aide des touches						nbre de cycles utilisés*
		GROUP 2	GO TO AR	CLEAR	GO TO DR	ENABLE	DISABLE	
Lire le registre du groupe 1 Lire le registre du groupe 2 Lire et R.A.Z. le registre du groupe 1 Lire le complément du registre du groupe 1	0		X					1
	1	X	X					1
	2		X	X	X			2
	3		≠					1
Lire la caractéristique du module	6		X					1
Contrôler un Appel Remettre à zéro le registre du groupe 1 Remettre à zéro l'Appel Remettre à zéro le registre du groupe 2	8							
	9			X	X			1
	10							
	11	X		X	X			1
Transcrire dans le registre du groupe 1 Transcrire dans le registre du groupe 2 Transcrire sélect. dans le reg. du groupe 1 Transcrire sélect. dans le reg. du groupe 2	16				X			1
	17	X			X			1
	18							-
	19							-
Mettre hors service Incrémenter le registre présélectionné Mettre en service Contrôler une indication d'état	24						X	1
	25							-
	26					X		1
	27					X ou	X	1

* pour réaliser la fonction désirée, la commande pouvant initialiser une séquence de plusieurs fonctions
≠ seulement en binaire

Tableau 3.3. Fonctions accessibles avec l'unité numérique

Chaque commande engendre donc une séquence particulière de fonctions (tableau 3.2), ce qui donne accès de manière directe ou indirecte à presque toutes les fonctions définies CAMAC, soit les principales fonctions agissant directement sur les modules CAMAC (cf. tableau 3.3), ainsi que toutes fonctions avec

C = 1 à 7

N = 24 à 31

A = 0 à 15

F = 0, 16, 24, 26, 27

utilisées pour des commandes particulières (cf. EUR 4600 e, CAMAC Organisation of multi-crate systems) agissant sur des modules de contrôle du système CAMAC lui-même (p. ex. les contrôleurs de baie, contrôleurs de branche, unités de multiplexage, etc...) ; une réponse Q = 1 à toute fonction F27 allume la lampe ENABLE. Cette unité ne peut toutefois adresser qu'une seule baie à la fois.

Cette console est prévue pour sortir les données sur différents périphériques (actuellement elle est reliée à une imprimante HP 561B) et elle dispose de plusieurs programmes de lecture (simple, répétitive, séquentielle) sélectionnés à l'aide des touches SINGLE, REPEAT, A to B, C to D, GENERAL ; A,B,C,D étant des adresses stockées dans les registres auxiliaires. La touche REPEAT permet de répéter la lecture du module adressé à une cadence d'environ une lecture à la seconde, pour s'accorder à la vitesse de l'imprimante, cette valeur pouvant facilement être modifiée.

3.3. Contrôle par ordinateur

L'Université de Genève dispose, pour ses groupes de recherche en expérience au CERN, d'un ordinateur IBM 1800 équipé pour l'acquisition des données en ligne et fonctionnant avec le système TSX version 3 modification 9.

3.3.1. Configuration et performances de l'ensemble IBM 1800

L'unité centrale a une capacité de mémoire de 32 k mots de 16 bits (+2) dont 16 k mots réservés aux programmes de système de gestion de la machine ; il ne reste donc que 16 k mots disponibles pour les programmes d'utilisation. Le cycle est de 2 μ s. Seules les opérations effectuées dans le mode entier ou à virgule fixe font appel à de la logique câblées alors que les opérations en virgule flottante nécessitent des sous-routines de calcul et prennent un temps beaucoup plus long.

La figure 3.4 montre la configuration de l'ensemble du système doté des périphériques suivants :

- une machine à écrire principalement utilisée pour la commande des programmes (64 car., 15 car/s, 130 car/ligne)
- 2 unités de disque pour le stockage des programmes et des données (2 x 512 k mots, 36 k mots/s, temps d'accès : 20 - 750 ms)
- 1 lecteur perforateur de cartes (lecture 300 cpm, perforation 80 col/s)

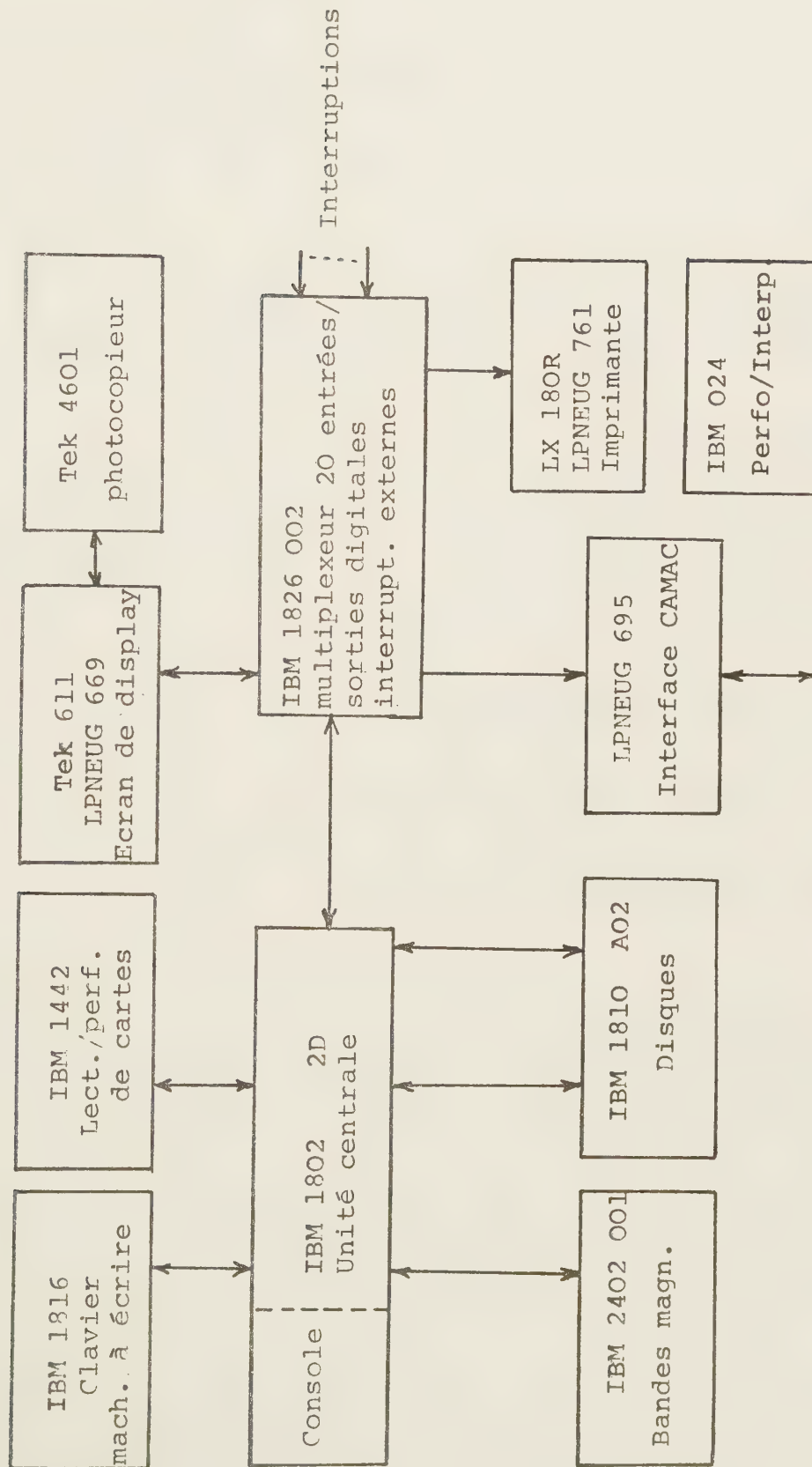


Fig. 3.4. Système IBM 1800 et périphériques du département de physique nucléaire et corpusculaire de l'université de Genève.

- 2 unités de bandes magnétiques (non utilisées dans notre travail)
- des canaux d'entrée-sortie rapides comprenant :
 - 2 entrées digitales de 16 bits (max. 500 k mots/s)
 - 2 sorties " " 16 " " " "fonctionnant selon le principe de "demande-réponse" et auxquels sont reliés, via un multiplexeur à 20 entrées-sorties digitales :
 - le système d'interruption
 - une imprimante pour résultats à conserver et listage des programmes (64 car, 180 car/s, mémoire tampon de 256 car)
 - 1 oscilloscope à mémoire pour affichage rapide de résultats numériques ou graphiques, avec photocopieur associé (2000 x 800 pts, 64 car., 2000 car/s, 44 k pts/s)
 - 1 interface pour le système CAMAC.

3.3.2. Mode d'utilisation

La calculatrice peut être programmée en langage FORTRAN IV standard ou en ASSEMBLER. Les nombres sont codés en binaire pur et la longueur des mots est de 16 bits ; les nombres entiers sont donc limités à $-2^{15} \leq n \leq 2^{15} - 1$, le 16^{ème} bit représentant le signe.

L'exécution des programmes se fait selon le principe du temps partagé. Le contrôle et la commande des programmes d'utilisation peuvent s'effectuer soit par la machine à écrire, soit à l'aide de 16 clés ou data switches sur la console de l'unité centrale.

3.3.3. Sous-routines CAMAC

La commande de l'installation CAMAC se fait, via l'interface, par appel d'une sous-routine de librairie FORTRAN, de la façon suivante :

CALL CAMAC (IWC, IC, IN, IA, F, IDATA) où

IWC : indique le mode d'adressage et de transfert des données selon le tableau ci-dessous.

IWC	nbre transfert	mode adressage	la fonction est exécutée
0	1	direct	à l'adresse CNA
1	1	relatif	à la lère adresse pouvant le faire à partir de l'adresse CNA
1	k	séquentiel	idem, mais pour IWC adresses, en balayage séquentiel dans l'ordre des sous-adresses, adresses et baies; les adresses ne répondant pas à la fonction étant sautées.
1	k	blocs séquentiels	par transfert de bloc, les blocs étant recherchés séquentiellement comme ci-dessus.

k = IWC pour mots de 16 bits et 2 x IWC pour 24 bits

Tableau 3.4 mode d'adressage et de transfert des données

IC = C, adresse de la baie avec $1 \leq C \leq 7$

Cette sous-routine ne permet donc pas d'adresser plus d'une baie à la fois.

Remarque : une valeur négative de IC signifie que la fonction doit être exécutée à l'adresse mémorisée dans l'interface.

IN = N, adresse du module dans la baie

$1 \leq N \leq 23$: correspond réellement à un module

$24 \leq N \leq 31$: utilisé pour commandes du système

Remarque : $IN = -N$ signifie que les données ont 24 bits et seront par conséquent transmises en 2 mots (tout d'abord les 8 bits de poids plus élevé, puis les 16 autres bits) ; dans ce cas le nombre de transfert sera $k = 2$ IWC.

IA = A, sous-adresse à l'intérieur du module ; $0 \leq A \leq 15$

F = F, fonction à exécuter ; $0 \leq F \leq 31$

IDATA : données ; leur signification dépend du type de fonction effectuée :

- écriture : le contrôleur génère les signaux de données sur les lignes W1 à W24 pour être écrites dans le module
- lecture : les signaux de données sont envoyés par le module sur les lignes R1 à R24 vers le contrôleur
- commande : le paramètre IDATA n'a pas de signification
- contrôle d'état : donne les réponses et l'adresse du module concerné dans le format suivant :

Q	X	O	O	C4	C2	C1	N16	N8	N4	N2	N1	A8	A4	A2	A1
état		baie					adresse					sous-adresse			

Par ailleurs, il existe une sous-routine de librairie FORTRAN également, pour l'initialisation du système CAMAC. Elle est appelée ACINI et effectue en particulier les fonctions de remise à zéro générale et suppression de veto. Cependant, ACINI n'envoie pas de commande Z (initialisation) ;

celle-ci se fait par hardware à l'enclenchement de l'IBM 1800.

Remarque :

Les signaux de LAM (appel des modules), de même que les signaux d'interruption traditionnels sont accessibles en ASSEMBLER mais pas en FORTRAN au niveau de la calculatrice.

D'autre part, l'interface possède une entrée par fiche LEMO 50Ω pour un signal de verrouillage en présence duquel toute opération est bloquée (si l'ordinateur est en dialogue avec l'interface à ce moment, il ne peut plus travailler tant que ce signal reste présent).

3.4. Contrôle mixte manuel/ordinateur

Il est possible de commander une voie CAMAC par deux sources distinctes à condition de disposer d'une unité de multiplexage. Cette unité peut être tout à fait standard, puisqu'elle se place au niveau de la branche CAMAC qui est bien définie (cf. Branch Mixer Unit Type 049, CERN-NP CAMAC Note 37-00). Elle peut servir par exemple :

- à utiliser un système CAMAC comme interface standard entre deux ordinateurs⁽⁹⁾
- à conserver en même temps que l'ordinateur de commande, l'accès à un contrôleur manuel pour des vérifications et mises au point d'expérience. Nous avons été amenés à l'utiliser de cette manière (fig. 3.5)

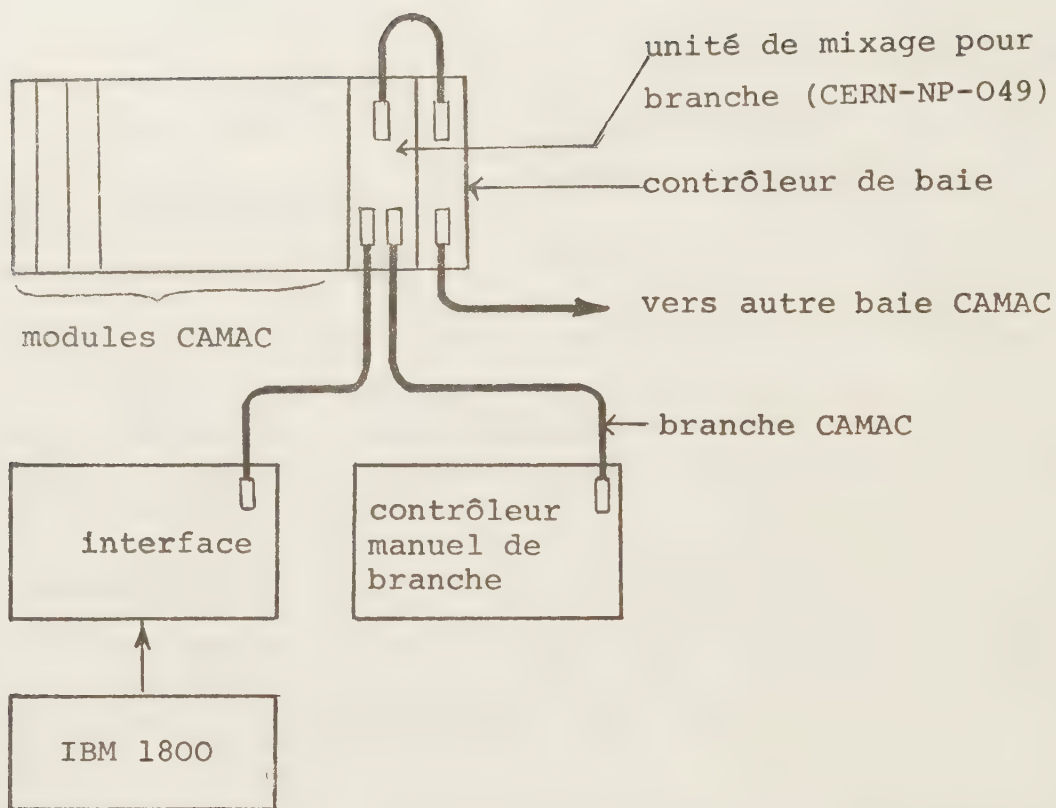


Fig. 3.5 Système à 2 sources de commande multiplexées

4. LES METHODES DE PROGRAMMATION

4.1. Conception modulaire des programmes

Le principe de la conception modulaire ayant fait largement ses preuves au niveau de l'instrumentation⁽¹⁰⁾, ⁽¹¹⁾, il nous paraît tout indiqué de l'appliquer à la programmation ; et ceci d'autant plus que lorsque celle-ci concerne directement la commande des modules fonctionnels d'une expérience. Cette conception permet, en effet, une grande souplesse et une grande variété d'emploi, qualités d'autant plus nécessaires que les expériences sont généralement sujettes à des modifications à plus ou moins long terme. En particulier, les expériences tendent à devenir plus complexes⁽⁹⁾ avec un plus grand nombre de composants, ceux-ci étant cependant à peu de chose près les mêmes que ceux utilisés initialement. Les programmes doivent donc facilement s'adapter à cette évolution.

Nous tentons de définir une structure standard en vue de simplifier l'écriture et la mise en oeuvre des nouveaux programmes. Au paragraphe 4.3., nous ferons en outre quelques considérations sur l'opportunité du découpage des programmes en nombreux sous-programmes du point de vue de la place nécessaire en mémoire et du temps d'exécution. Un exemple de structure est décrit au paragraphe 4.4, mettant en évidence le rôle spécifique et le schéma d'écriture de chaque type de programme.

4.2. Conditions imposées par :

4.2.1. L'utilisateur :

La télécommande a pour objectif de faciliter le travail du physicien expérimentateur. Elle ne doit donc pas se traduire par un surcroît de peine pour sa mise en oeuvre. En particulier, elle ne doit pas nécessiter d'apprentissage spécial.

Les commandes se font à partir de la machine à écrire, selon un code simple et clair affiché, sur la machine à écrire ou sur l'écran de "display", à chaque demande de programme. L'usage des clés "data switches" permet de choisir parmi plusieurs variantes d'un même programme, toujours selon le même code.

L'entrée des paramètres se fait également sur la machine à écrire, à la demande du programme ; elle doit être limitée à ceux dont la valeur change. D'autre part, le programme doit détecter automatiquement les valeurs de paramètres qui pourraient compromettre le déroulement de l'expérience (p. ex. valeurs excessives pour la tension d'alimentation de photomultiplicateurs ou de chambres à fils) et signaler l'erreur à l'opérateur, l'exécution du programme étant stoppée. Par ailleurs, il doit être possible de réinitialiser un programme avant son exécution si l'on se rend compte que les valeurs données ne sont pas bonnes.

Les résultats doivent être présentés sous une forme concise

et claire, facile à interpréter, permettant une analyse rapide (p. ex. courbe ou valeurs caractéristiques). L'information complète doit cependant être accessible pour une analyse plus approfondie si nécessaire (p. ex. tableau de valeurs) et éventuellement conservée en mémoire pour des traitements ultérieurs.

4.2.2. La structure de l'expérience

Pour jouer pleinement son rôle d'interface entre l'expérimentateur et l'expérience, la programmation doit permettre, en plus des commandes complexes, l'accès individuel à chaque fonction principale de l'expérience.

D'autre part, des changements de configuration peuvent intervenir en cours d'expérience (p. ex. remplacement d'un module défectueux par un autre situé à une autre adresse). Ces changements doivent pouvoir être indiqués directement à partir du clavier de la machine à écrire, sans avoir besoin de recharger le programme.

4.2.3. Le type de contrôle à effectuer

Les grandeurs commandées ici sont en boucle ouverte (pas de contre-réaction, pas de problèmes de stabilité de réglage). Il s'agit en fait de relever une, ou partie de caractéristique pour en tirer les valeurs qui nous intéressent.

Nous avons essentiellement deux types de contrôles à effectuer :

- d'une part, le relevé d'une caractéristique et le choix d'un point de fonctionnement
- d'autre part, le contrôle de la stabilité dans le temps d'un point de fonctionnement (p. ex. d'un jour à l'autre ou avant chaque nouvelle série d'acquisition de données).

Nous nous attachons dans ce chapitre au premier problème ; le second sera traité pour un exemple au chapitre 5 (§ 5.5).

4.2.4. Le programmeur

En dernier lieu, il sied également de simplifier la tâche du programmeur en définissant un modèle général qui permet d'écrire rapidement tout nouveau programme. Ceci s'accorde parfaitement avec la conception modulaire de la programmation.

4.3. Structure générale des programmes

Nous définissons toute une hiérarchie de programmes et sous-programmes avec :

- un programme principal : qui contient les paramètres fixes et les différentes options de programmes d'exécution.
 - des programmes d'exécution : qui peuvent faire appel à leur tour à différents niveaux de sous-programmes.
- L'enchaînement des programmes se fait :
- à la demande de l'utilisateur (pour le choix des programmes d'exécution ; éventuellement pour le choix d'options à l'intérieur de ceux-ci).

- ou par programmation (enchaînement des différents sous-programmes utilisés dans un programme d'exécution).

La communication entre les divers sous-programmes fait usage d'un COMMON (zone de mémoire commune à tous les programmes) dans lequel sont mémorisés les paramètres fixes ainsi que les résultats. Ces derniers sont ainsi accessibles à différents programmes de traitement (p. ex. pour les sortir sous forme de courbe, ou de tableau, ou pour chercher une valeur particulière).

On peut se demander dans quelle mesure il est intéressant de mettre une partie de programme sous forme de sous-programme. Rappelons que nous travaillons avec le système TSX (cf. § 3.2 chap. 3).

Du point de vue occupation de la mémoire, il est facile de déterminer un critère. En effet, considérons une suite d'opérations utilisant l positions mémoire. On sait que le traitement d'une sous-routine FORTRAN avec n arguments d'appel occupe en mémoire :

- 2 places pour l'appel de la sous-routine
 - 1 place pour chaque argument (n places)
 - 2 places pour le retour à la fin de la sous-routine
- } dans programme principal

Le gain de la mémoire, si le sous-programme est appelé N fois, est

$$M = N \cdot \ell - ((2+n)N + \ell + 2) \quad (4.1)$$

Par conséquent, l'emploi de la sous-routine diminue l'occupation mémoire si

$$N > \frac{\ell + 2}{\ell - 2 + n} \quad (4.2)$$

En exprimant ℓ en fonction de n avec N en paramètre, on obtient la relation linéaire

$$\ell > \ell_0 \text{ avec } \ell_0 = \frac{(2+n)N+2}{N-1} \quad (4.3)$$

qui conduit aux abaqes de la figure 4.1

Valeurs limites : $N = 2$	$\ell_0 = 6 + 2n$
$N = \infty$	$\ell_0 = 2 + n$

L'emploi de la sous-routine est d'autant plus favorable du point de vue occupation mémoire que les inégalités suivantes sont plus grande :

$$\ell > \ell_0 \qquad n < n_0 \qquad N > N_0$$

ℓ, n, N sont des nombres entiers.

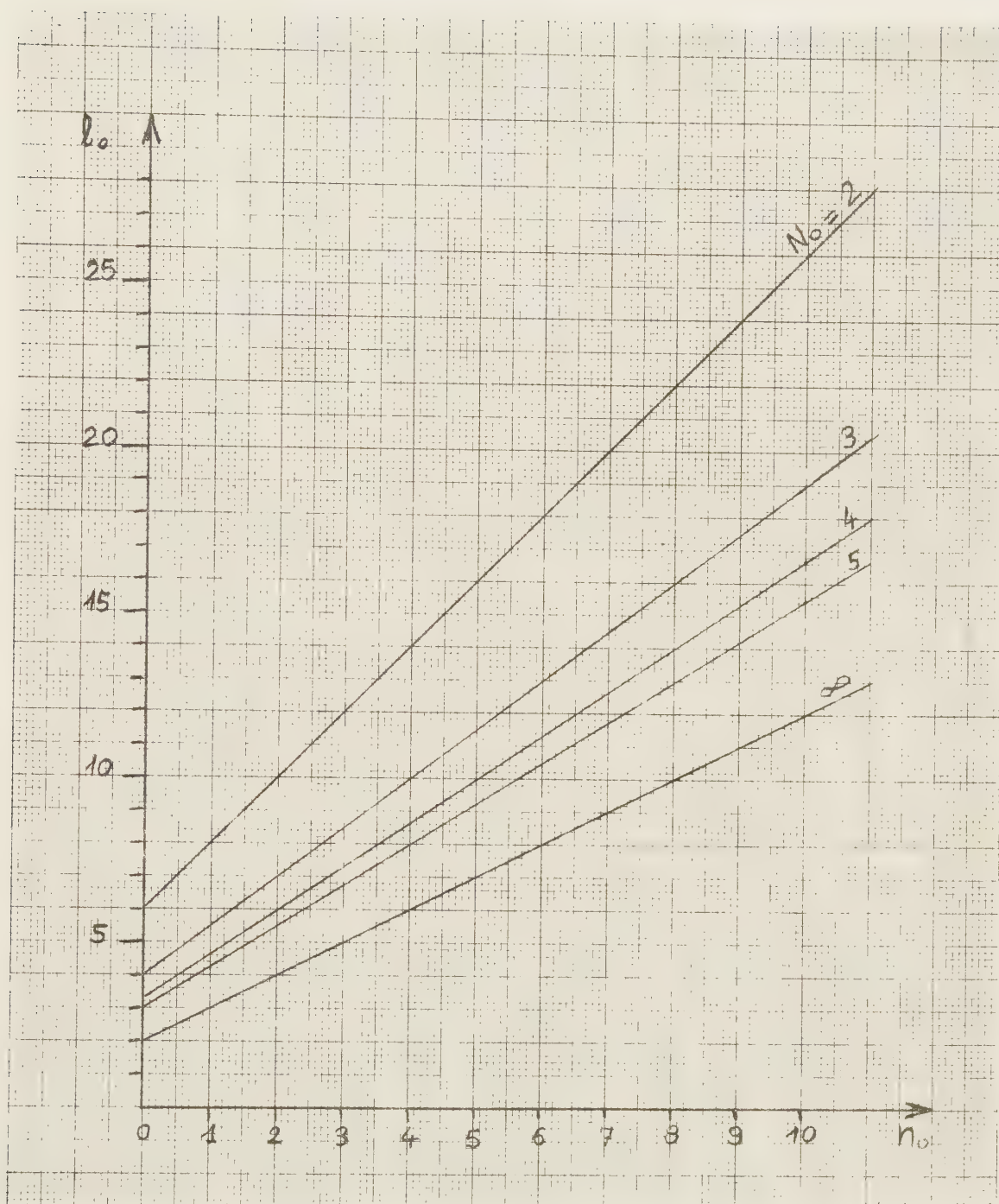


Fig. 4.1. Abaques reliant la longueur minima l_0 de la sous-routine, le nombre d'arguments n_0 et le nombre d'appels N_0 .

Du point de vue du temps d'exécution, il est beaucoup plus difficile de déterminer un critère, car le temps varie considérablement avec le type d'instruction exécutée. Admettons qu'il est en moyenne de 4 μ s par instruction. En considérant que l'appel d'une sous-routine FORTRAN prend de l'ordre de 300 μ s (exécution de SUBIN : sous-routine d'initialisation), la longueur du sous-programme (dans le cas de programme à déroulement linéaire, c'est-à-dire ne contenant pas de boucle) doit être au moins de 750 instructions pour que le temps d'appel ne dépasse pas 10 % du temps utile.

Là, il devient très intéressant de considérer le cas de sous-routines écrites en langage assembleur. La difficulté d'écriture est compensée par un gain de place en mémoire d'un facteur 2 au moins (en raison de mode d'adressage) pouvant aller jusqu'à 5 ou plus (par optimisation du programme) et d'un gain de temps d'exécution d'un facteur 10 en moyenne, souvent bien meilleur. Le temps d'appel d'une sous-routine en assembleur n'est plus que de 10 μ s environ.

Par conséquent, il paraît très intéressant de décomposer chacune des commandes de base en une sous-routine écrite en assembleur, les différents programmes d'utilisation étant écrits au fur et à mesure des besoins en FORTRAN, selon un schéma général standard dont un exemple est donné au paragraphe suivant.

4.4. Exemple d'une structure

4.4.1. Programme principal (PP)

Il contient tous les paramètres fixes tels que :

- les constantes d'utilité générale
- la configuration de l'expérience : liste des adresses de tous les modules
- les valeurs limites des variables (p. ex. pour la protection contre les fausses manoeuvres)

Ces deux derniers types de paramètres peuvent cependant être modifiés ultérieurement, si nécessaire, à partir du clavier (options changement de configuration, respectivement changement des valeurs limites).

Il demande la date au clavier.

Il exécute ensuite le programme ACINI d'initialisation de l'ensemble du système CAMAC. Il contient enfin les appels de tous les programmes d'exécution (PE) selon l'option demandée au clavier de la machine à écrire.

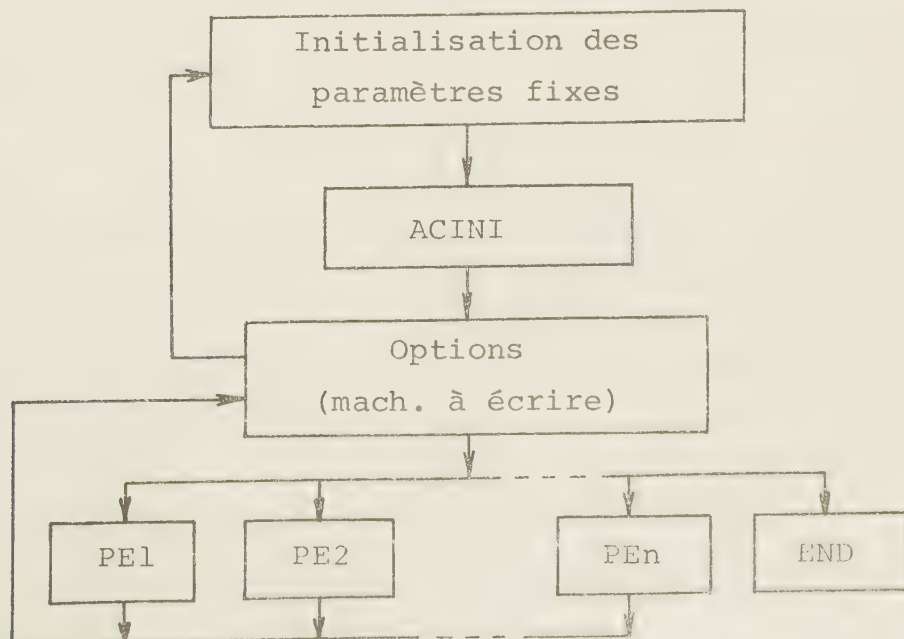
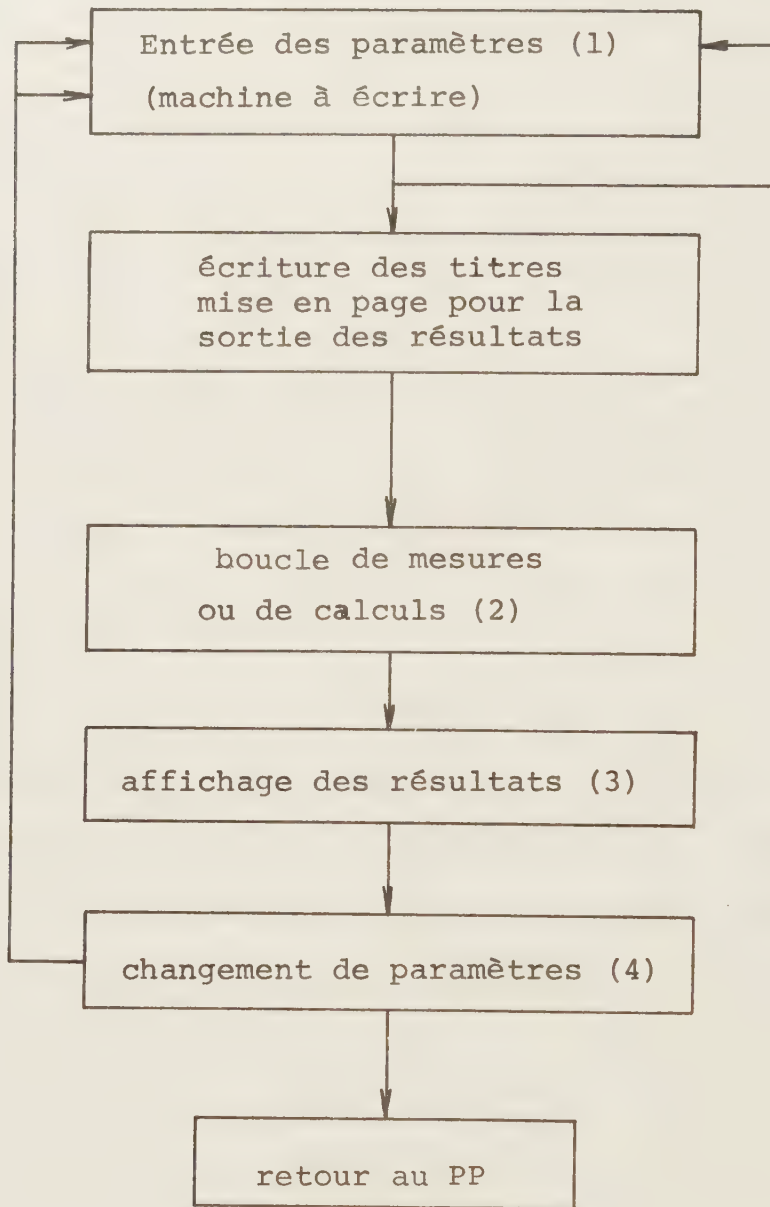


Fig. 4.2. Organigramme du programme principal

4.4.2. Les programmes d'exécution (PE)

Ils comprennent les fonctions suivantes :



- (1) l'ordre est choisi de manière à ne réinitialiser qu'un minimum de paramètres lors de la répétition du programme avec de nouvelles données
- (2) et (3) peuvent être scindés en plusieurs parties
- (4) selon option indiquée par la machine à écrire

Chacune des fonctions peut faire appel à des sous-programmes de base ou spécifiques.

Fig. 4.3 Organigramme général des programmes d'exécution

4.4.3. Les sous-programmes de base :

Il existe deux types de sous-programmes de base selon qu'ils correspondent à

- des opérations spécifiques ou une commande définie de l'instrumentation ; par exemple :

GRIF : trace une courbe sur l'écran à partir d'un tableau de valeurs

BETA : applique une valeur donnée de haute tension

GAMA : fait la lecture d'un groupe d'échelles et donne la valeur relative du comptage

- une partie purement software qui se répète pour chaque programme ; par exemple :

TEMPS : définit les paramètres utilisés pour un temps de comptage donné au clavier

CHANG : procédure d'option pour le changement des paramètres à la fin de chaque programme d'exécution.

Ce sont ces programmes qu'il apparaît intéressant d'écrire en langage assembleur.

4.4.4. Les sous-programmes spécifiques

Ils ont des tâches plus particulières, mais peuvent être utilisés dans plusieurs variantes de programmes. Par exemple :

EPSI : recherche d'une valeur dans une table

PLATO : relevé d'un "plateau de photomultiplicateur"

DELTA : relevé d'une courbe d'efficacité en fonction d'un retard

ATTEN : relevé d'une courbe d'efficacité en fonction de
l'amplitude du signal de diode
etc...

4.4.5. Exemple : voir figure 5.6 au chapitre suivant.

D'autres exemples sont également présentés aux figures
6.2, 6.8, 6.11 du chapitre 6 et 7.9 du chapitre 7.

4.5. Choix des algorithmes

Il y a deux approches possibles, p. ex. pour déterminer
le choix d'un point de fonctionnement.

4.5.1. Méthode triviale :

qui consiste à relever point par point toute la caractéristique à étudier , puis à rechercher dans la table des résultats les valeurs souhaitées. Dans ce cas, le même algorithme est valable pour toutes sortes de grandeurs à mesurer ; p. ex. "plateau" de photomultiplicateur ; courbe de retard, etc...

4.5.2. Algorithme particulier :

adapté à la forme de la caractéristique considérée. Si l'allure de la caractéristique est favorable, il peut être avantageux (gain de temps et d'occupation mémoire) d'en tenir compte pour obtenir le résultat en ne mesurant qu'un minimum de points.

5. APPLICATION A LA RECHERCHE DU POINT DE FONCTIONNEMENT DES PHOTOMULTIPLICATEURS

5.1. Le détecteur à scintillation

5.1.1. Principe

Un des plus importants dispositifs de détection de particules en physique nucléaire est le compteur à scintillations composé essentiellement d'un cristal (scintillateur) associé à un tube photomultiplicateur (fig. 5.1).

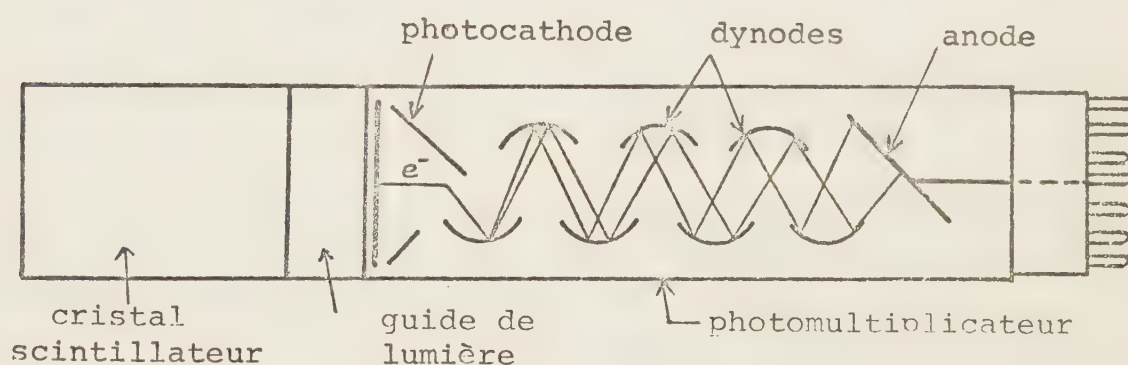


Fig. 5.1. Principe du détecteur à scintillation

Lorsqu'un photon est absorbé par un cristal, il engendre un photoélectron ou des électrons Compton qui, tout au long de leur parcours dans le cristal, cèdent leur énergie en donnant naissance à des phénomènes de scintillation. Les photons lumineux sont recueillis par un photomultiplicateur et transformés en impulsions de tension ou en courant.

Le photomultiplicateur est un tube électronique dont la cathode est photoémissive (photocathode). Lorsque les photons frappent cette cathode, ils émettent des électrons secondaires lesquels sont à leur tour focalisés par action d'un champ électrique sur une seconde électrode (dynode) d'où ils font sortir chacun plusieurs autres électrons secondaires. Après multiplication à travers une cascade de dynodes, les électrons

sont finalement recueillis à l'anode du tube. Cette charge s'écoule dans le circuit anodique.

Un des principaux avantages du compteur à scintillation est de fournir un courant anodique proportionnel à l'énergie cédée par la particule incidente.

5.1.2. Gain du photomultiplicateur

Pour N_0 photons atteignant la photocathode, le nombre des électrons recueillis sur l'anode du photomultiplicateur est

$$N = \sigma \cdot c \cdot G \cdot N_0 \quad (5.1)$$

où σ = rendement quantique de la photocathode

c = rendement de collection de l'optique d'entrée

G = gain du multiplicateur

Or pour un photomultiplicateur à n dynodes, le gain vaut

$$G = g^n \quad (5.2)$$

avec $g \simeq \delta$ (coefficient d'émission secondaire) si le couplage entre étages est proche de 1 et

$$\delta = k V \quad (5.3)$$

V étant la tension interétage ($\simeq \frac{V \text{ totale}}{n + 1}$ si la répartition est uniforme entre les étages); k est à peu près constant pour le domaine de tension qui nous intéresse.

On voit donc que :

$$G \sim V^n \quad \text{et} \quad \frac{dG}{G} = n \frac{dV}{V} \quad (5.4)$$

Les autres paramètres dépendant de la construction du tube, le seul moyen à disposition de l'utilisateur pour régler le gain du photomultiplicateur est donc d'agir sur la tension d'alimentation.

Valeurs limites :

Pour assurer d'une part le fonctionnement correct de l'optique électronique et d'autre part la saturation interétage (pour éviter en particulier l'effet de la résistance ohmique de la photocathode et celui de la résistance de charge à l'anode) la tension doit être au moins (pour le tube type 56 AVP)

- 80V entre dynodes
- 100V entre cathode et 1ère dynode
- $60V + U_s$ entre dernière dynode et anode; U_s étant l'amplitude max. du signal utile mesuré aux bornes de la résistance de charge.

Ce qui fait, pour le type 56 AVP (14 dynodes), une tension d'alimentation minimum d'environ 1250 Volts.

Par ailleurs, une valeur limite maximale de la tension d'alimentation est prescrite (2500 V pour le 56 AVP) afin d'éviter le claquage du tube. Cependant, sans atteindre cette limite, l'utilisation du photomultiplicateur avec des tensions élevées fait apparaître des courants parasites (courants d'obscurité) qui peuvent fausser les mesures (bruit de fond). Ces courants ont pour principales origines :

- émission thermique (agitation thermique des électrons dans la photocathode et les dynodes)
- émission froide (effet de champ)
- ionisation des gaz résiduels (les ions positifs peuvent remonter vers les premiers étages et provoquer une émission d'électrons secondaires)
- réactions lumineuses (fluorescence du verre sous l'effet de bombardement par des électrons)
- fuites ohmiques

Lorsque la tension croît, le courant d'obscurité augmente puis devient instable et, à la limite, le tube accroche.

Fluctuations de l'amplitude de sortie :

Dans l'expression (5.1), les grandeurs σ , c et G sont en fait les valeurs moyennes de paramètres caractérisant des phénomènes aléatoires. Il en résulte que la valeur réelle de N est sujette à des fluctuations statistiques.

On montre (13,14) que la variance relative due au photomultiplicateur est

$$v_{\phi}^2 = \frac{1 - \sigma + \sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^i g_j)^{-1}}{\bar{N}_0 \sigma} \quad (5.5)$$

avec $\bar{N}_0$ = nombre moyen de photons arrivant sur la photocathode.

5.2. La caractéristique "en plateau" du photomultiplicateur

5.2.1. Traitement du signal d'anode

Le signal recueilli à l'anode du photomultiplicateur est envoyé dans le circuit de la figure 5.2.

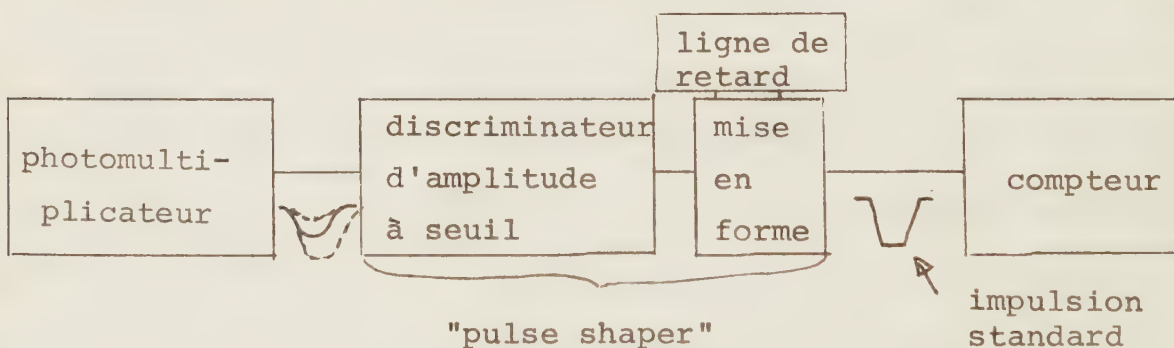


Fig. 5.2. traitement du signal à la sortie du photomultiplicateur

Le circuit appelé "pulse shaper" comprend deux parties :

- le discriminateur d'amplitude. Dans notre cas, il s'agit d'un discriminateur à seuil fixe (deux entrées au choix respectivement à 50mV et 350mV).

- un circuit de mise en forme qui délivre à la sortie, pour chaque impulsion acceptée par le discriminateur, une impulsion d'amplitude standard NIM ($-0.5V$ sur 50Ω) et dont la durée est fixée à l'aide d'une ligne de retard (câble coaxial 50Ω). Il existe généralement plusieurs sorties identiques et anti-sorties (signaux de polarité inversée) pour attaquer simultanément différents circuits de logique pour le traitement de l'information.

5.2.2. Caractéristique mesurée à l'aide de diodes photoémissives

Un générateur envoie des impulsions à fréquence fixe sur une diode photoémissive placée dans le guide de lumière à l'avant de la cathode du photomultiplicateur (cf. chap. 2 §2.7).

L'efficacité du comptage des impulsions lumineuses par le photomultiplicateur est mesurée à l'aide du dispositif suivant (fig. 5.3)

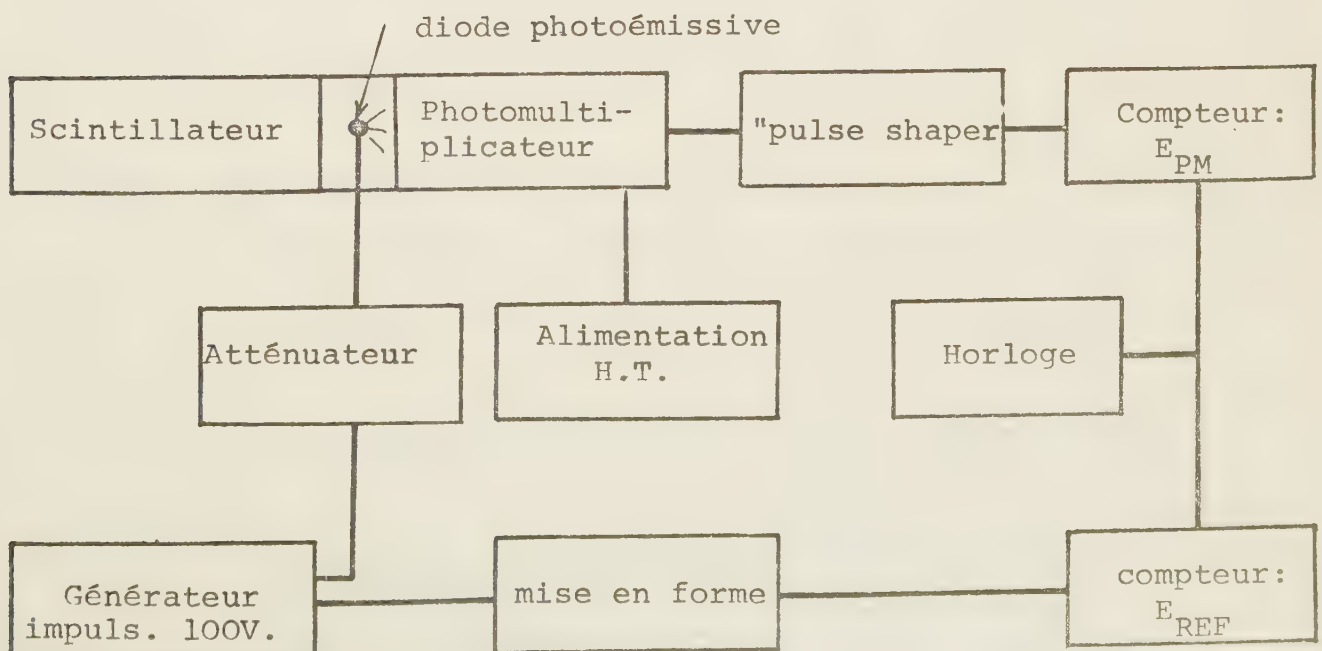


Fig. 5.3. Schéma-bloc du dispositif de mesure de l'efficacité de comptage avec une diode photoémissives

En supposant que l'énergie lumineuse de chaque impulsion d'une part et le gain du photomultiplicateur d'autre part, soient des grandeurs non aléatoires, nous devrions relever en fonction de tension d'alimentation la caractéristique a) de la figure 5.4, U_0 étant fonction de l'énergie lumineuse (respectivement de la tension appliquée aux bornes de la diode).

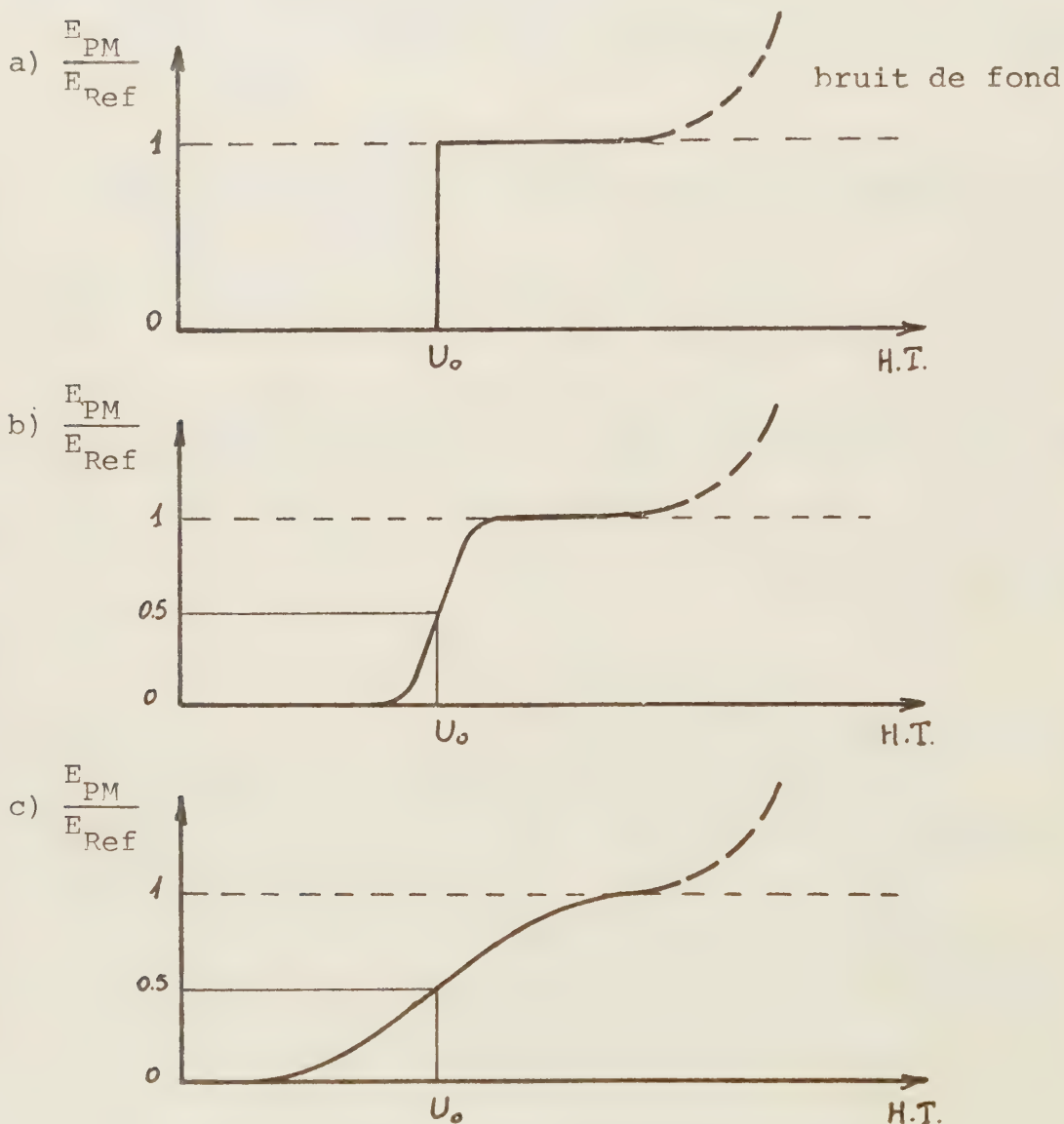


Fig. 5.4. Allure de l'efficacité de comptage en fonction de la tension d'alimentation du photomultiplicateur

- a) pour gain et énergie lumineuse non aléatoire
- b) pour gain aléatoire et énergie lumineuse fixe
- c) pour gain et énergie lumineuse aléatoire.

En fait, les fluctuations statistiques du gain du photomultiplicateur, ainsi que celles de l'émission des diodes déforment cette caractéristique et l'on doit s'attendre à l'allure b) si les fluctuations dues aux diodes sont relativement faibles.

Dans le cas où les fluctuations de l'énergie émise par les diodes sont importantes (p. ex. lorsque les impulsions sont de très faible amplitude), la caractéristique se déforme encore plus et se rapproche de l'allure que l'on doit attendre avec une source radioactive et un scintillateur (courbe c).

La figure 6.3a (chap. 6) montre les caractéristiques mesurées avec différentes tensions appliquées à la diode.

On peut améliorer les mesures en soustrayant pour chaque point le taux de comptage obtenu sans signal de diode, pour le même temps de comptage et la même valeur de haute tension. Ceci permet de prolonger vers les hautes tensions la caractéristique en plateau (fig. 6.3.b).

5.2.3. Choix du point de fonctionnement

On désire une efficacité stable autour du point de fonctionnement et un bruit de fond faible par rapport au taux de comptage utile.

Pour cela, on ajuste le signal sur la diode photoémissive de façon à avoir une énergie lumineuse du même ordre de grandeur que la moyenne attendue dans l'expérience envisagée. On relève la courbe d'efficacité en fonction de la tension d'alimentation du photomultiplicateur et l'on fixe le point de fonctionnement au milieu de la partie plate de la caractéristique.

5.3. Conditions de mesures

5.3.1. Programme

Le programme dont l'organigramme est reproduit à la figure 5.5., permet de relever point par point la caractéristique d'efficacité de comptage du photomultiplicateur en fonction de la haute tension, pour un signal donné sur la diode photo-émissive.

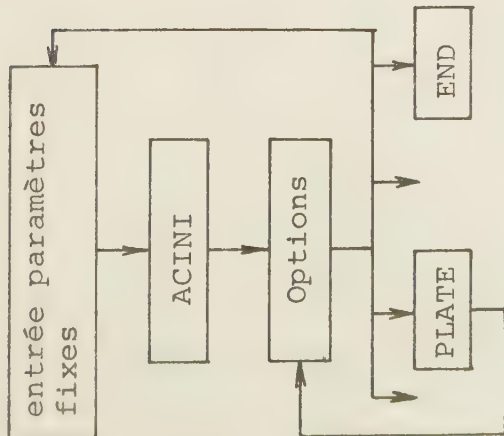
Les données sont respectivement :

- la tension sur la diode (valeur de l'atténuation appliquée)
- les valeurs extrêmes et l'incrément de la haute tension
- les valeurs caractéristiques d'efficacité, soient :
 - E1 = début du "plateau"
 - E2 = fin du "plateau"
 - E3 = référence pour contrôle du bruit de fond(les valeurs typiques sont E1 = 98%; E2 = 102%; E3 = 150%)
- la durée de comptage
- le numéro du photomultiplicateur à mesurer.

Les mesures débutent à la valeur maxima de la tension. Deux variantes sont possibles, à choisir au moyen du "data switch" 1 (sur la console de l'IBM 1800) :

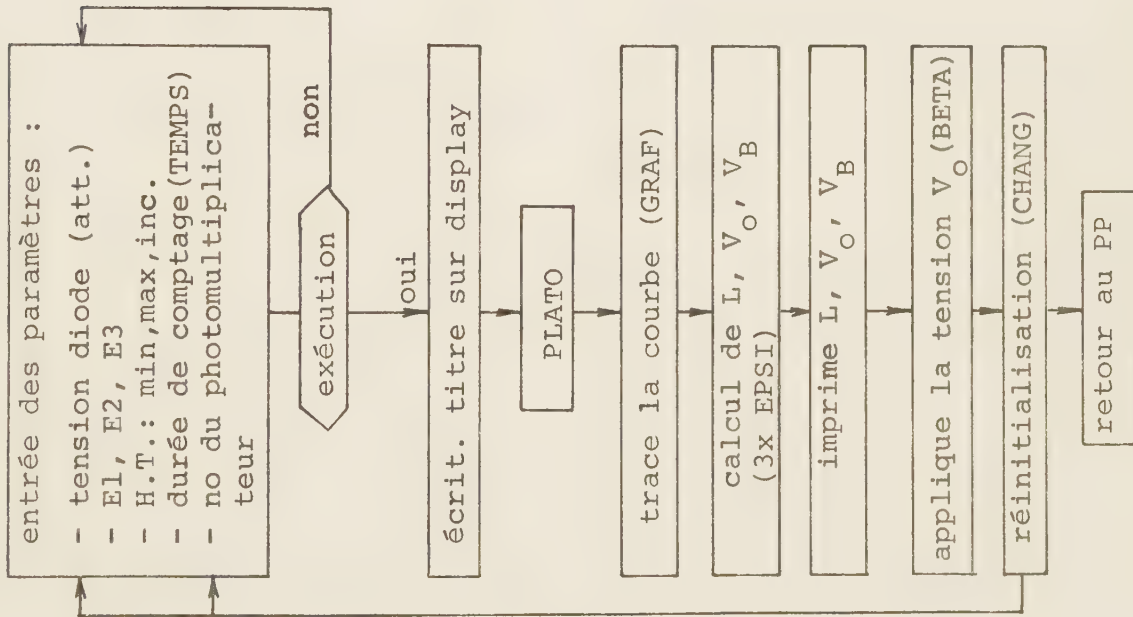
- position "EN" : mesure du bruit de fond à chaque point et déduction automatique de l'efficacité obtenue avec la diode, ceci jusqu'à ce que le taux de bruit de fond devienne inférieur à 1% de celui du signal de la diode.
- position "HORS" : mesure simple, sans déduction du bruit.

programme principal



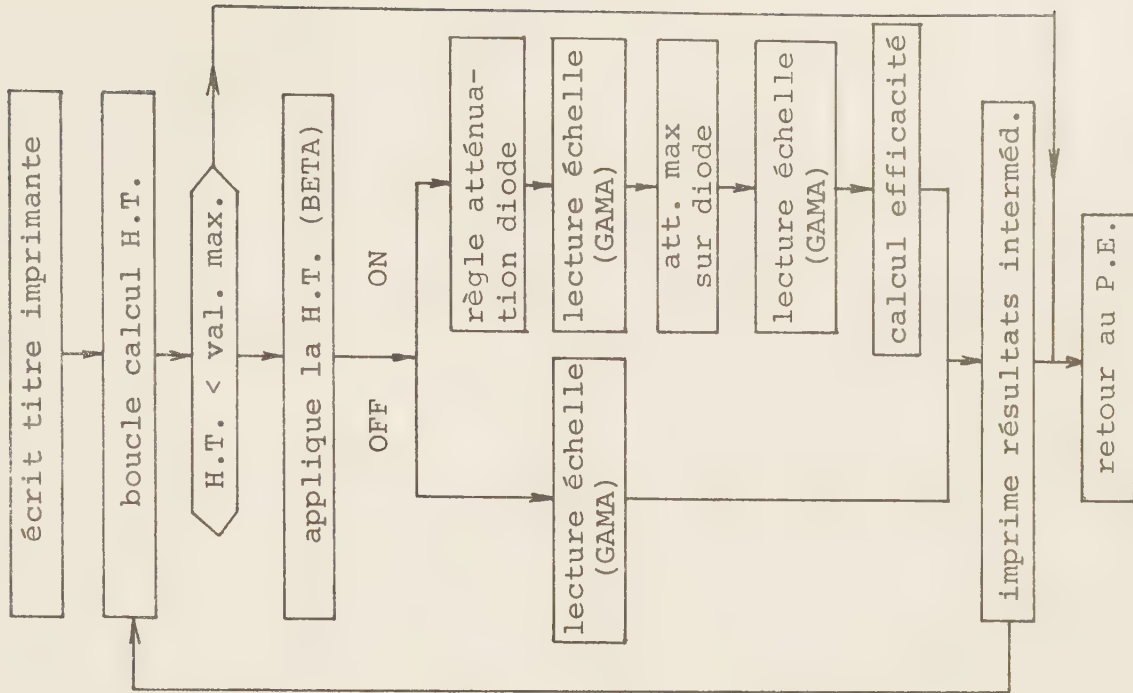
programme d'exécution:

PLATE



sous-programme spécifique:

PLATO



sous-programmes de base

utilisés :

TEMPS : 1 fois

GRAF : 1

EPSI : 3

BETA : n + 1

GAMA : n à 2n

CHANG : 1

n = nbre de pts de mesure

Fig. 5.6. Organigramme du relevé du "plateau" de photomultiplicateur

Les résultats apparaissent d'une part sous forme d'une courbe affichée sur l'écran de "display" et d'autre part sont imprimés sous forme de tableau de valeurs. Les valeurs des paramètres de mesures et la date sont également affichés. Un exemple est reproduit à la figure 5.6.

Les valeurs de la tension correspondant aux efficacités

E1, E2 et E3 servent à définir :

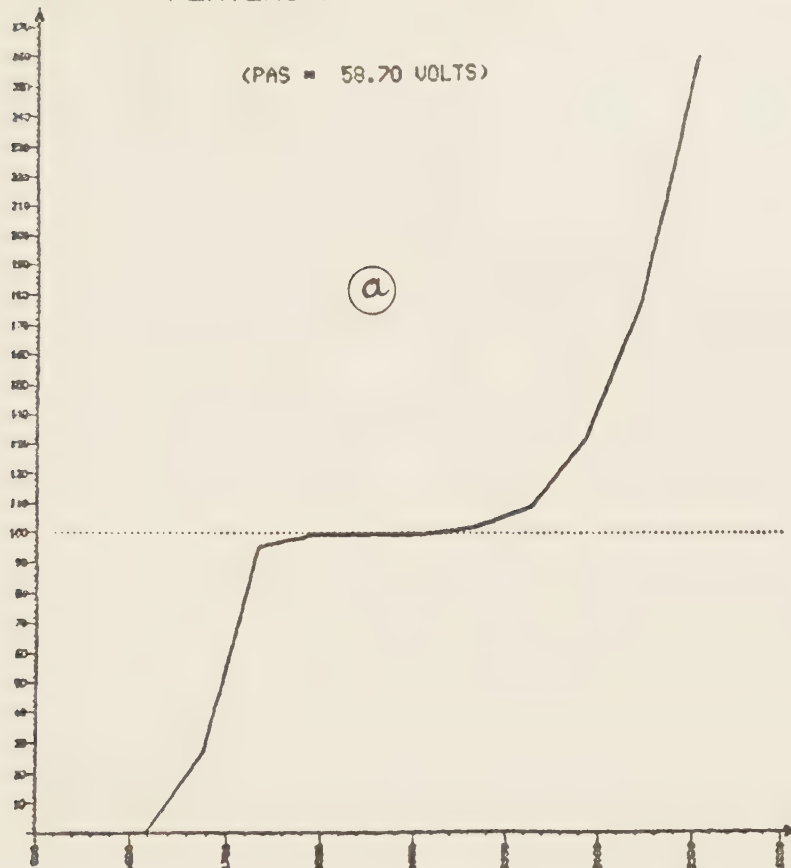
- la largeur du plateau : $L = V(E2) - V(E1)$
- le point de fonctionnement : $V_o = \frac{V(E2) + V(E1)}{2}$
- la tension pour un niveau de bruit de fond déterminé.

La tension V_o est automatiquement appliquée au photomultiplicateur.

5.3.2. Mesures avec ou sans déduction du bruit de fond

Si le taux de comptage attendu dans l'expérience est élevé vis à vis de celui du bruit de fond, il est intéressant de déduire le bruit de fond. La caractéristique présente alors un "plateau" plus large et par conséquent une efficacité de comptage plus stable pour le signal à mesurer. Le niveau de bruit de fond pour le point de fonctionnement choisi doit être mémorisé pour être ensuite déduit des mesures. Il peut varier au cours du temps; cependant cet effet reste limité si les conditions de fonctionnement du photomultiplicateur restent stables. Un contrôle de la stabilité du point de fonctionnement doit alors être fait à intervalles réguliers pour corriger les dérives éventuelles.

PLATEAU DU PM NUMERO 2



X = HAUTE TENSION APPLIQUEE EN VOLTS
 Y = TAUX DE COMPTAGE EN POUR CENT
 PARAMETRES DE MESURE JJ= 0 KK=120 LL= 10

TEMPS DE COMPTAGE = 3.6 SEC

I	IV(I)	IE(I)	ATT = 3.00 dB
1	1500 VOLTS	0 %	
2	1558 VOLTS	0 %	
3	1617 VOLTS	0 %	
4	1676 VOLTS	28 %	
5	1734 VOLTS	97 %	
6	1793 VOLTS	100 %	
7	1852 VOLTS	100 %	
8	1910 VOLTS	100 %	
9	1969 VOLTS	102 %	
10	2028 VOLTS	110 %	
11	2086 VOLTS	127 %	
12	2145 VOLTS	180 %	
13	2204 VOLTS	265 %	

LARGEUR PLATEAU = 225 VOLTS
 MILIEU PLATEAU A 1856 VOLTS
 GAIN 150 POUR CENT A 2115 VOLTS

Fig. 5.6 Mesure de "plateau" de photomultiplicateur:
 sortie des résultats

a) sur l'écran du "display"

b) sur l'imprimante

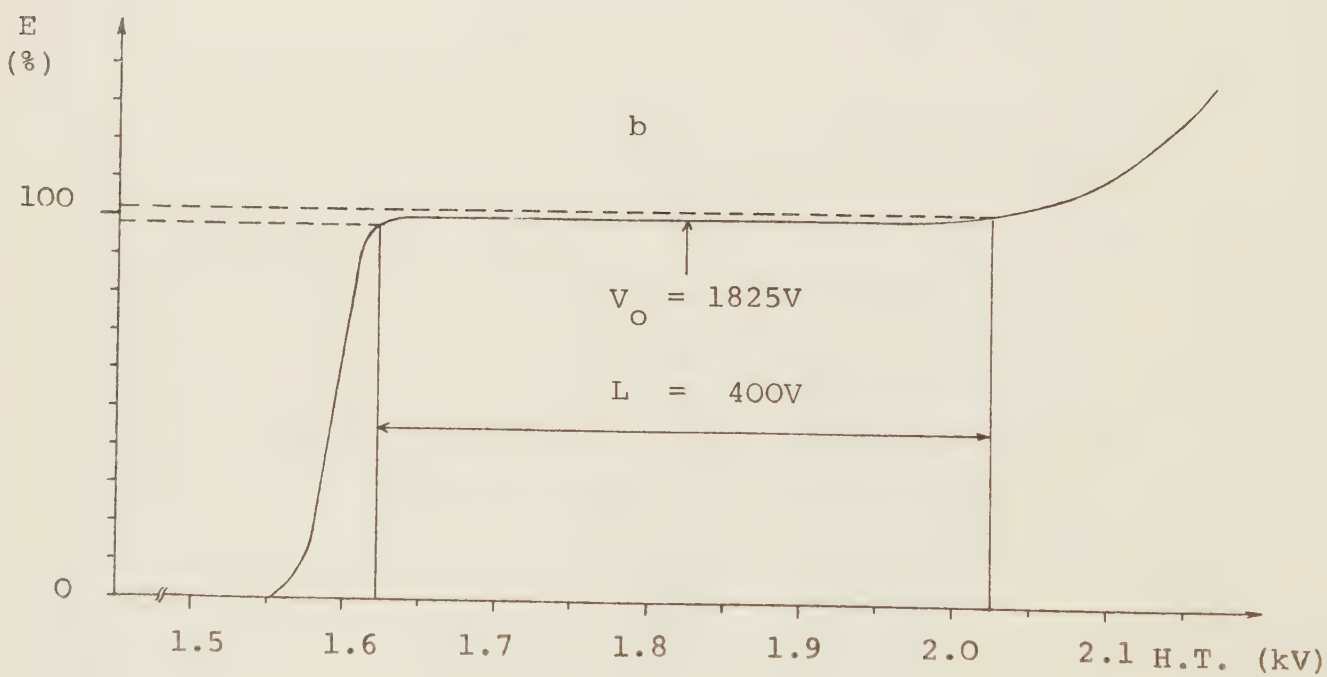
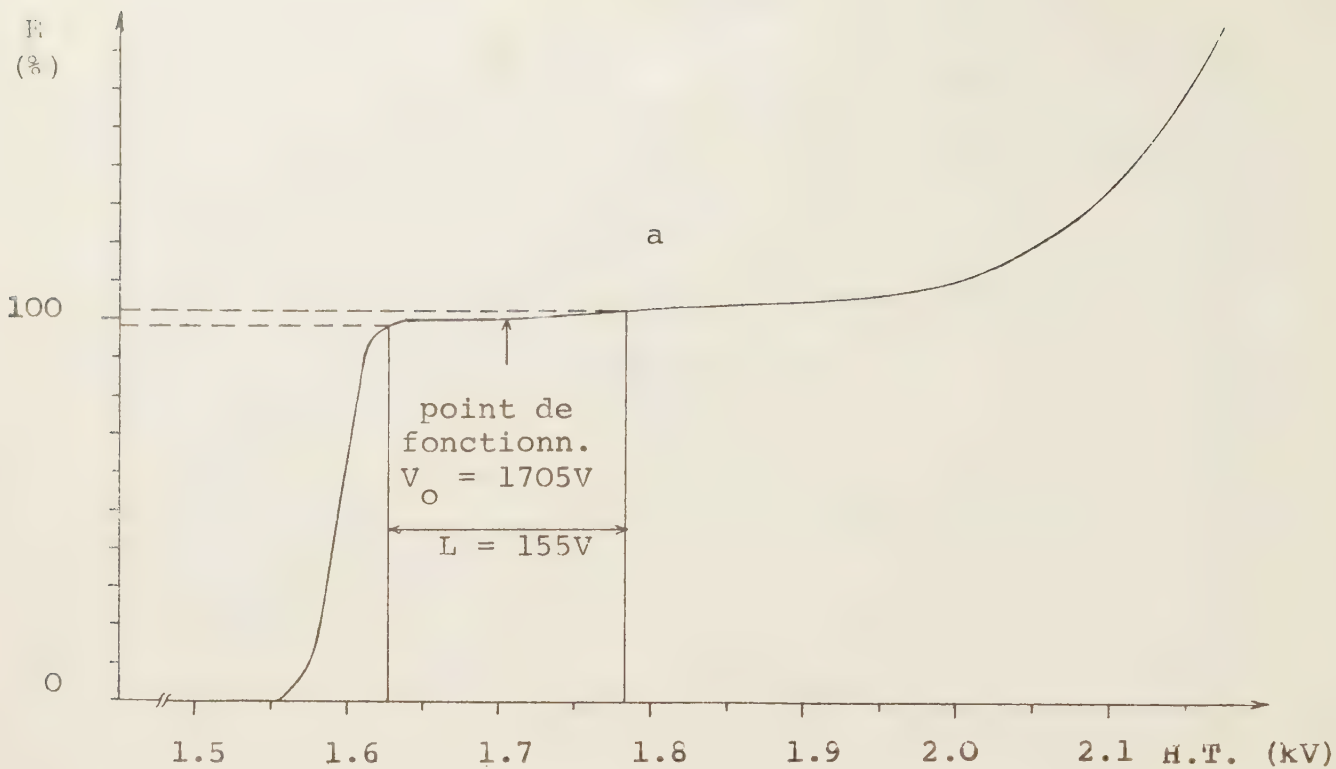


Fig. 5.7. Choix du point de fonctionnement

a) sur caractéristique sans déduction du bruit de fond

b) sur caractéristique avec déduction du bruit de fond

Par contre, si le taux de comptage attendu est faible, il est préférable de choisir la zone de travail où le bruit reste faible. Le choix du point de fonctionnement se fera sur une caractéristique sans déduction du bruit de fond.

La figure 5.7 montre l'avantage de la caractéristique avec déduction du bruit de fond par rapport à celle sans déduction du bruit de fond, lorsque le taux de comptage le permet.

5.3.3. Nombre de points de mesure

La précision nécessaire dépend du but poursuivi. Si on désire connaître complètement la forme de la caractéristique, il faut faire la mesure point par point, à intervalles réguliers. Par contre, si l'on ne s'intéresse qu'à la partie appelée "plateau" afin de fixer le point de fonctionnement du photomultiplicateur, il n'est pas nécessaire de mesurer toute la caractéristique avec la même précision car, en fait, seuls les points avec les efficacités E_1 et E_2 (définies au § 5.3.1.) sont intéressants.

5.3.3.1. Comparaison entre les deux algorithmes

Dans la première alternative, une mesure avec 5 points équidistants donne déjà une idée de l'allure de la courbe (fig. 5.8a). L'opérateur peut ensuite choisir quelle partie il est utile de mesurer avec précision. Mais en règle générale, 10 points de mesure pour l'ensemble de la courbe donnent une bonne approximation (fig. 5.8b).

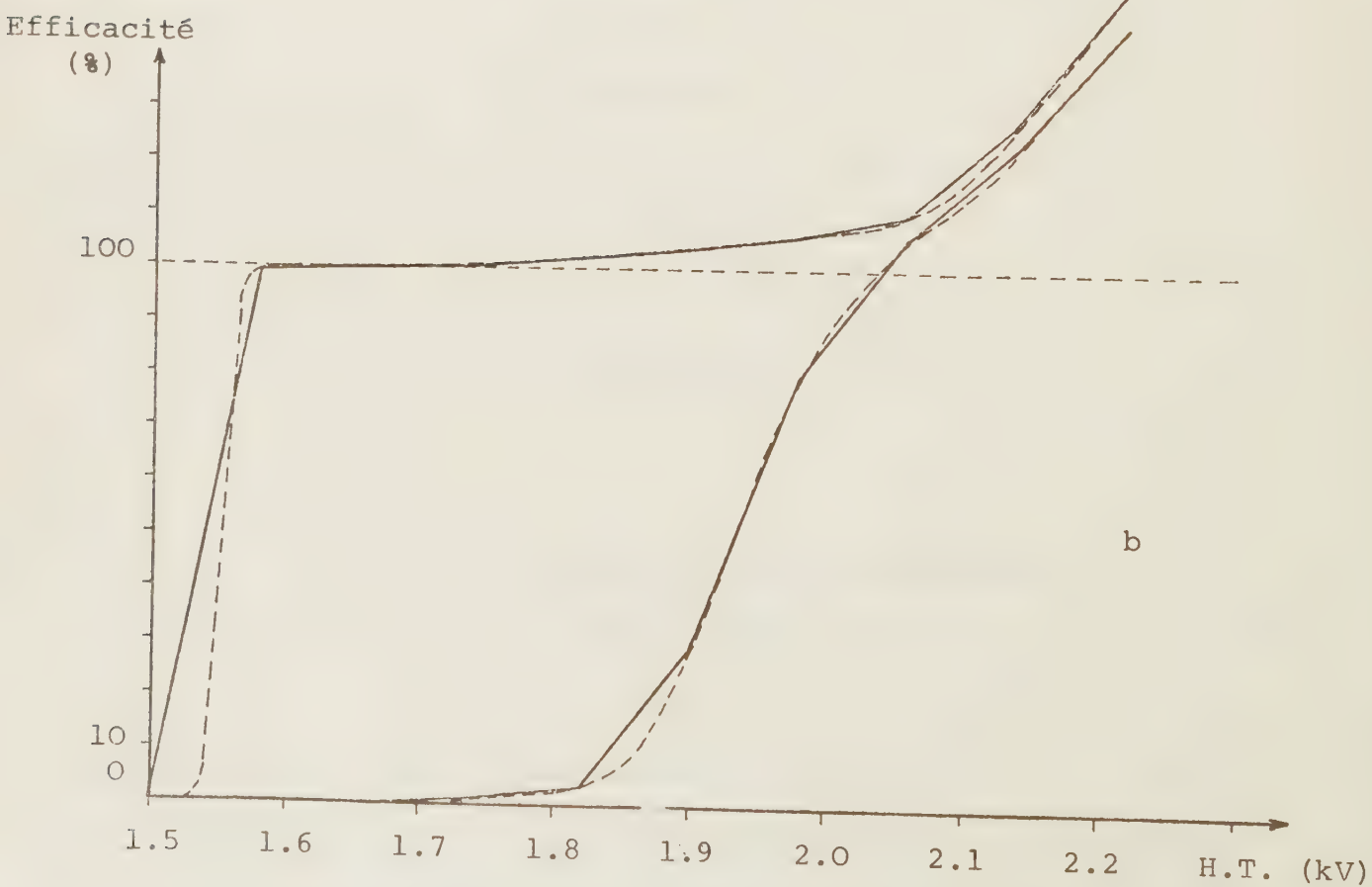
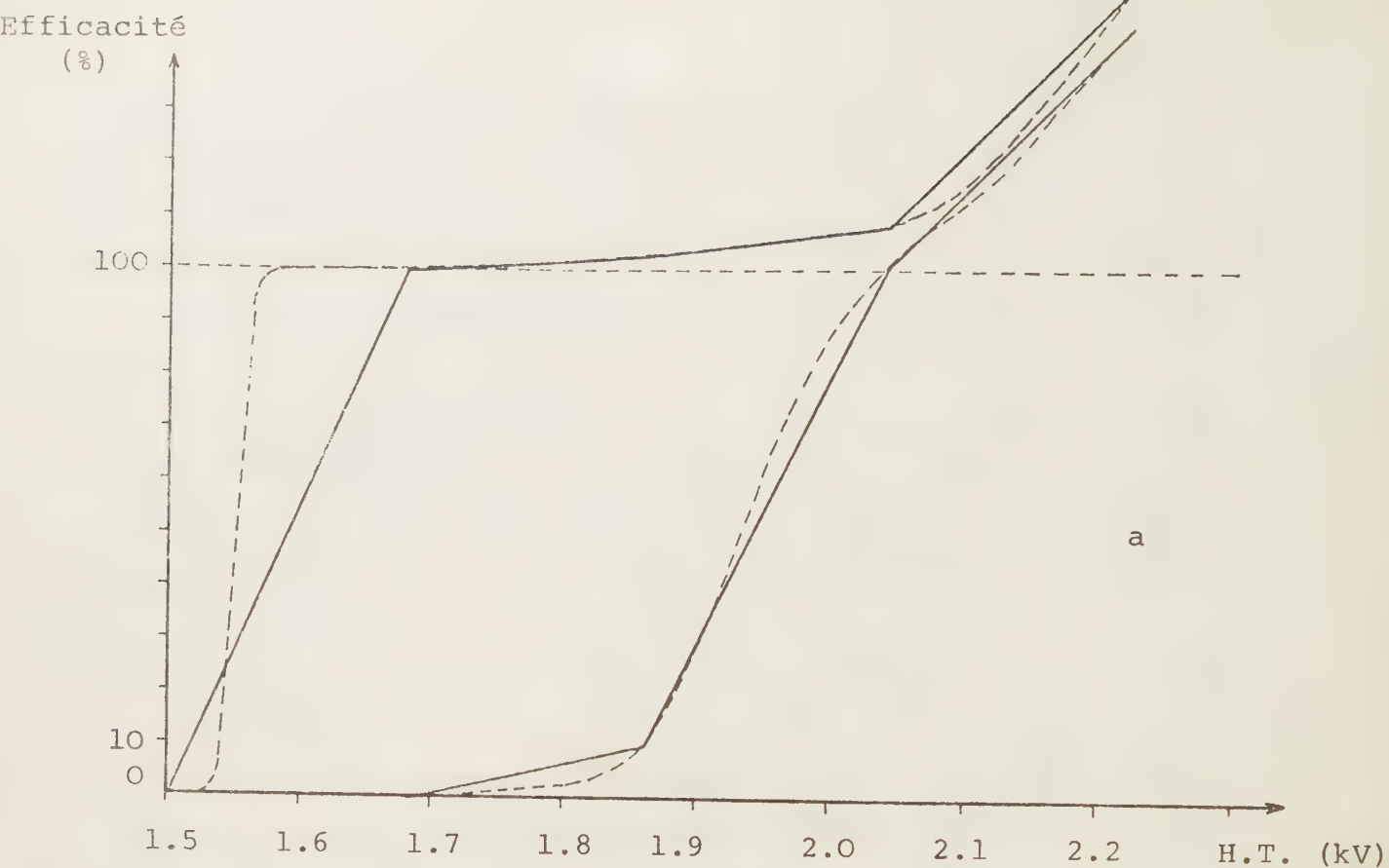


Fig. 5.9. Deux exemples de caractéristiques mesurées
a) en 5 points
b) en 10 points
En pointillé, les mêmes caractéristiques avec 50 points

L'autre alternative consiste à mesurer tout d'abord 3 points ($V_{\min}$, V_{moy} et $V_{\max}$), puis à diviser en deux le segment dans lequel l'interpolation linéaire place la valeur E_1 , respectivement E_2 ; et ainsi de suite jusqu'à ce que :

- le dernier pas soit égal à l'incrément de la première méthode pour la précision désirée

- ou l'efficacité mesurée E satisfasse

$$|E - E_1| \text{ (resp. } |E - E_2|) \leq \text{écart donné.}$$

Le tableau 5.1 montre que cette méthode est intéressante lorsque la précision demande plus de 9 points de mesure.

mes. équidistantes	approximations successives
3 points	3 points
5 "	5 " ; soient $3+2 \begin{cases} 1 \text{ pour } E_1 \\ 1 \text{ pour } E_2 \end{cases}$
9 "	7 " ; " 5+2
17 "	9 " ; " 7+2
$2n + 1$ "	$3+2(n-1)$ " ; avec $n > 1$

Tableau 5.1. Nombre de points nécessaires pour obtenir E_1 et E_2 avec la même précision par chacune des deux méthodes.

La figure 5.9 montre deux exemples typiques de courbes obtenues par chacune des deux méthodes.

La méthode par approximations successives présente cependant

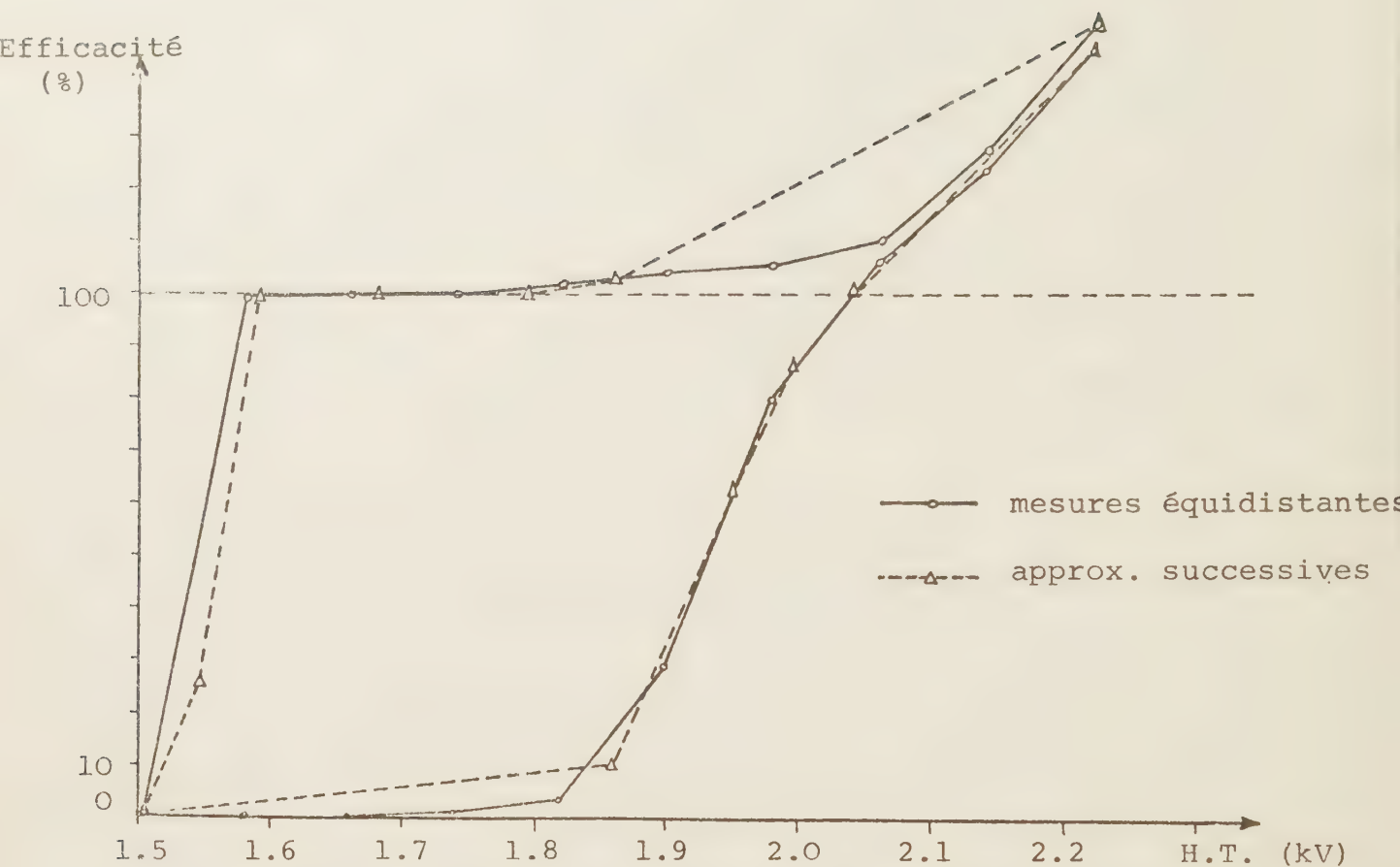


Fig. 5.9. Comparaison entre les 2 méthodes pour 2 exemples typiques

le risque de ne pas donner les points extrêmes du plateau si la caractéristique est particulièrement plate dans la zone considérée ; il y aura donc lieu d'en tenir compte dans le choix des valeurs de E_1 et de E_2 .

5.3.3.2. Erreurs due à l'interpolation entre les points de mesure

Nous avons vu que les caractéristiques ont des formes comprises entre :

- celle avec un plateau très marqué : elle se décompose, en gros, en 3 segments

- et celle avec un plateau très peu marqué : elle devient à peu près linéaire.

L'interpolation linéaire entre les points de mesure entraîne des erreurs sur les valeurs obtenues pour les limites E1 et E2 du plateau.

nombre de points	incrément de tension (volts)	caract. type 1 (avec plateau)			caract. type 2 (~ linéaire)		
		L	M	B	L	M	B
38	17.6	215	1691	2009	16	2036	2230
23	29.3	205	1690	2011	14	2037	2225
13	59	179	1703	1998	13	2039	228
7	128	159	1694	2008	16	2045	2220

L = largeur du "plateau" en volts (entre E1=98% et E2=102% d'eff.)

M = tension au milieu du "plateau" en volts (point de fonctionnement)

B = tension pour efficacité de 150% (référence pour le bruit de fond)

Tableau 5.2. Effet de l'interpolation linéaire entre les pts de mesure sur les valeurs caractéristiques du "plateau" pour 2 exemples typiques.

Comme on peut le voir dans le tableau ci-contre, les erreurs sont :

- plus importantes pour la caractéristique du 1er type. Le plateau mesuré sera, en fait, plus étroit que le plateau réel avec cependant, en moyenne, une erreur faible sur la position du milieu de plateau; ce défaut n'est pas très grave puisque l'on dispose d'une grande plage de réglage et que le point de fonctionnement n'est pas critique.
- moins importantes, en valeur absolue, pour la caractéristique du 2ème type, puisque l'approximation se rapproche de la forme réelle de la courbe; il y a cependant un risque que le point de fonctionnement se déplace légèrement vers la droite du fait de la convexité de la courbe.

5.3.4. Temps de mesure

Une fois les données introduites, le temps nécessaire à l'établissement de la courbe de "plateau" est dû essentiellement

- à la durée de comptage
- au temps de commande de la haute tension
- au temps d'impression des résultats

La durée de comptage est limitée par le taux absolu de comptage nécessaire pour assurer des fluctuations minima de l'efficacité. On a donc intérêt à travailler avec une fréquence d'impulsions de diode aussi élevée que possible.

L'efficacité de comptage est définie (cf. chap. 5, § 5.2.2.) comme étant le rapport

$$E = \frac{E_{PM}}{E_{REF}} \quad ; \quad \begin{array}{l} E_{PM} = \text{nombre de coups à la sortie du PM} \\ E_{REF} = \text{nombre d'impulsions sur la diode} \\ \text{pendant le même temps} \end{array}$$

Dans la zone du "plateau", c'est-à-dire où E vaut 100%, les fluctuations de E dans le temps sont relativement faibles puisque la diode émet avec une fréquence fixe et que, d'autre part, les comptage E_{PM} et E_{REF} sont corrélés.

On peut cependant définir une limite lorsque le taux de comptage absolu varie de ± 1 coup. Dans ce cas, pour assurer que la fluctuation de E ne dépasse pas e%, le temps de comptage doit être au moins égal à

$$T = \frac{100}{e \cdot f} \quad ; \quad f = \text{fréquence des impulsions de la diode}$$

Dans notre cas $f_{\max} = 3\text{kHz}$ (cf. chap. 2 §2.7), ce qui donne, pour $e = 1\%$

$$T_{\min}(1\%) = 0.033 \text{ sec}$$

L'expérience a donné les résultats suivants ($e = \pm$ écart max. obtenu avec 20 mesures dans chaque cas) :

T(sec)	E_{REF} (coups)	e(%)
20	47'163	0.002
1	2'374	0.04
0.5	1'186	0.08
0.2	473	0.21
0.05	118	0.85
0.01	23	4.3

avec $f = 2.4\text{kHz}$

Tableau 5.3. Fluctuations e de E (dans la zone $E = 100\%$) mesurés en fonction de la durée, respectivement du taux absolu de comptage.

Il est inutile cependant de vouloir trop diminuer la durée de comptage, car le gain total en temps reste faible vis-à-vis du temps qui reste nécessaire pour la commande de la haute tension. En effet, le contrôle de la haute tension (lecture par voltmètre digital) prend environ 1 seconde et la tension met environ 0.5s/100 V pour s'établir. Ainsi, par exemple, le relevé d'une caractéristique avec 10 points prend un temps

total T donné dans le tableau ci-dessous, pour différentes conditions de mesure.

T	T_c	T_{HT}
~ 20 s	1 s	1 s
15	0.5	1
10	0.1	1
10	0.5	0.5
6	0.1	0.5
4	0.1	0.3

Tableau 5.4. Temps de mesure pour 10 points avec T_c = durée de comptage par point et T_{HT} = temps de commande HT par point ($T_{HT} < 1$ s : lecture pour contrôle supprimée).

A partir de 0.5 s pour la mesure d'un point, le temps d'impression des résultats intervient. Il convient alors de supprimer la sortie des résultats complets sur l'imprimante et de ne conserver que l'impression des valeurs caractéristiques (L , V_o) du plateau et la courbe affichée sur l'écran.

Il ressort du tableau ci-dessus que 15 s sont en moyenne nécessaires pour obtenir une caractéristique précise tandis que 4 s suffisent pour un simple contrôle. Deux exemples sont représentés à la fig. 5.10.

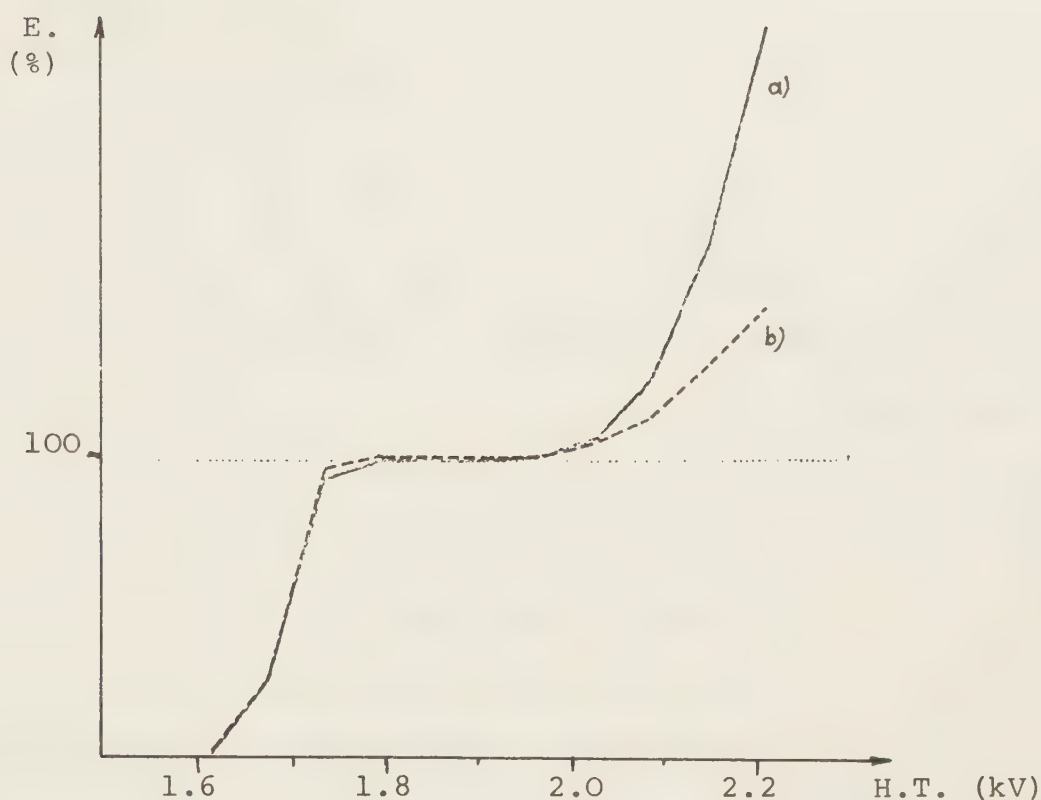


Fig. 5.10. Caractéristiques relevées

a) en 15 secondes

b) en 4 secondes

On voit apparaître sur la courbe b l'effet du retard de la haute tension à s'établir. Ceci est très net surtout pour le point à tension maximum, car la courbe étant relevée suivant les tensions décroissantes, le saut de tension pour le premier point est de l'ordre de 350 V si l'on part d'un point de fonctionnement moyen.

A titre indicatif, rappelons que le relevé de la caractéristique selon le même principe mais à l'aide de l'unité de commande manuelle présentée au chap. 3 (§ 3.1.2.), prend en moyenne 10 s. par point.

La principale limite dans le temps de mesure vient donc du temps d'établissement de la haute tension. Dans les expériences utilisant un grand nombre de photomultiplicateurs, on peut améliorer le temps nécessaire pour le contrôle des points de fonctionnement en commandant les tensions en parallèle et en faisant la lecture séquentielle de tous les photomultiplicateurs. Cependant, il faudra plus de mémoire pour traiter simultanément les différentes caractéristiques. Il serait intéressant alors de fixer le nombre optimum de photomultiplicateurs à contrôler en même temps, compte tenu de la mémoire disponible et du temps accordé pour la mesure.

On peut également envisager de ne faire, en cours d'expérience, qu'un simple contrôle du point de fonctionnement et de ne relever la courbe complète que si le contrôle montre un écart supérieur à une valeur prédéterminée afin de redéfinir le point de fonctionnement ou de donner une alarme en cas de défectuosité.

6. APPLICATION A DIFFERENTS ELEMENTS DE COMMANDE

6.1. Etalonnage des photomultiplicateurs à l'aide des diodes photoémissives

Au chapitre 5, nous avons montré comment relever un "plateau" de photomultiplicateur dont la photocathode est éclairée par des impulsions lumineuses provenant d'une diode photoémissive. Il est intéressant de voir la relation entre la tension nécessaire sur le photomultiplicateur pour obtenir 100% d'efficacité de comptage, en fonction de l'impulsion sur la diode, c'est-à-dire de l'énergie lumineuse émise par la diode.

6.1.1. Energie lumineuse émise par la diode

Nous ne pouvons fixer ici que des ordres de grandeur. Le fabricant indique pour la diode XP21 une intensité lumineuse de $2.8 \cdot 10^{-6}$ lumens/mA avec un spectre dont le maximum se situe vers 6300 Å, ce qui correspond à environ $2.8 \cdot 10^{10}$ eV/s.

Pour une impulsion dont la largeur est environ 7 ns à mi-hauteur, l'énergie émise est donc d'environ 200 eV/mA. Mais seulement 1/3 environ de cette énergie est émise dans la bande de réponse du PM.

D'autre part, des mesures de réflectométrie⁽⁸⁾ conduisent à la caractéristique tension/courant de la diode, respectivement tension/énergie lumineuse émise, reproduite à la figure 6.1. L'échelle E^{PM} correspond à la fraction de lumière émise dans la bande de réponse du PM.

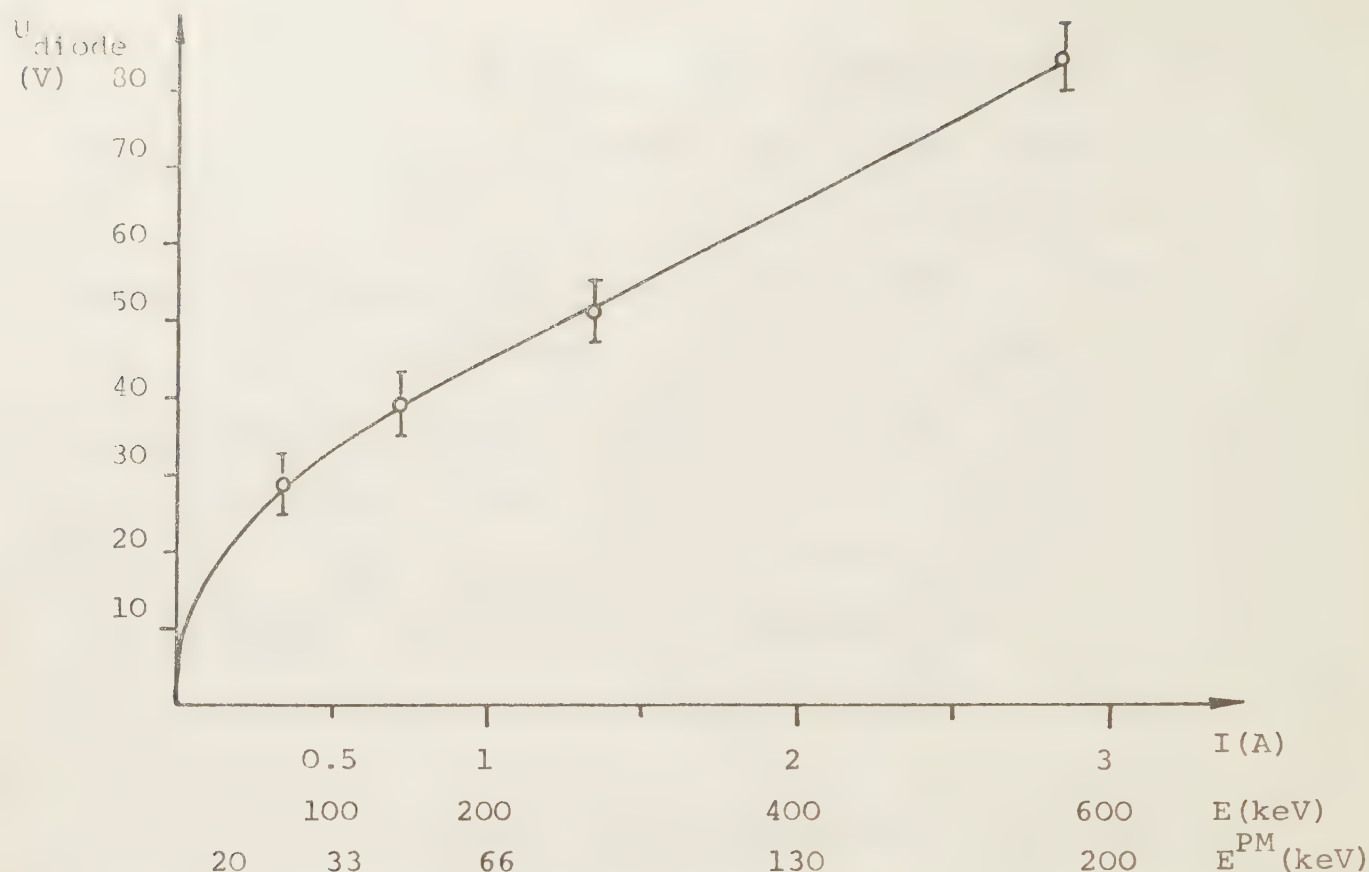


Fig. 6.1. Caractéristique tension/courant, respectivement énergie lumineuse émise de la diode XP21 (durée de l'impulsion ≈ 7 ns)

6.1.2. Méthode de mesure

Le montage est le même que celui décrit à la figure 5.3. (chapitre 5).

D'autre part, nous disposons du programme spécifique PLATO que nous avons utilisé dans le programme d'exécution PLATE (cf. chap. 5, § 5.3.1.) pour le relevé de la courbe de "plateau" de photomultiplicateur.

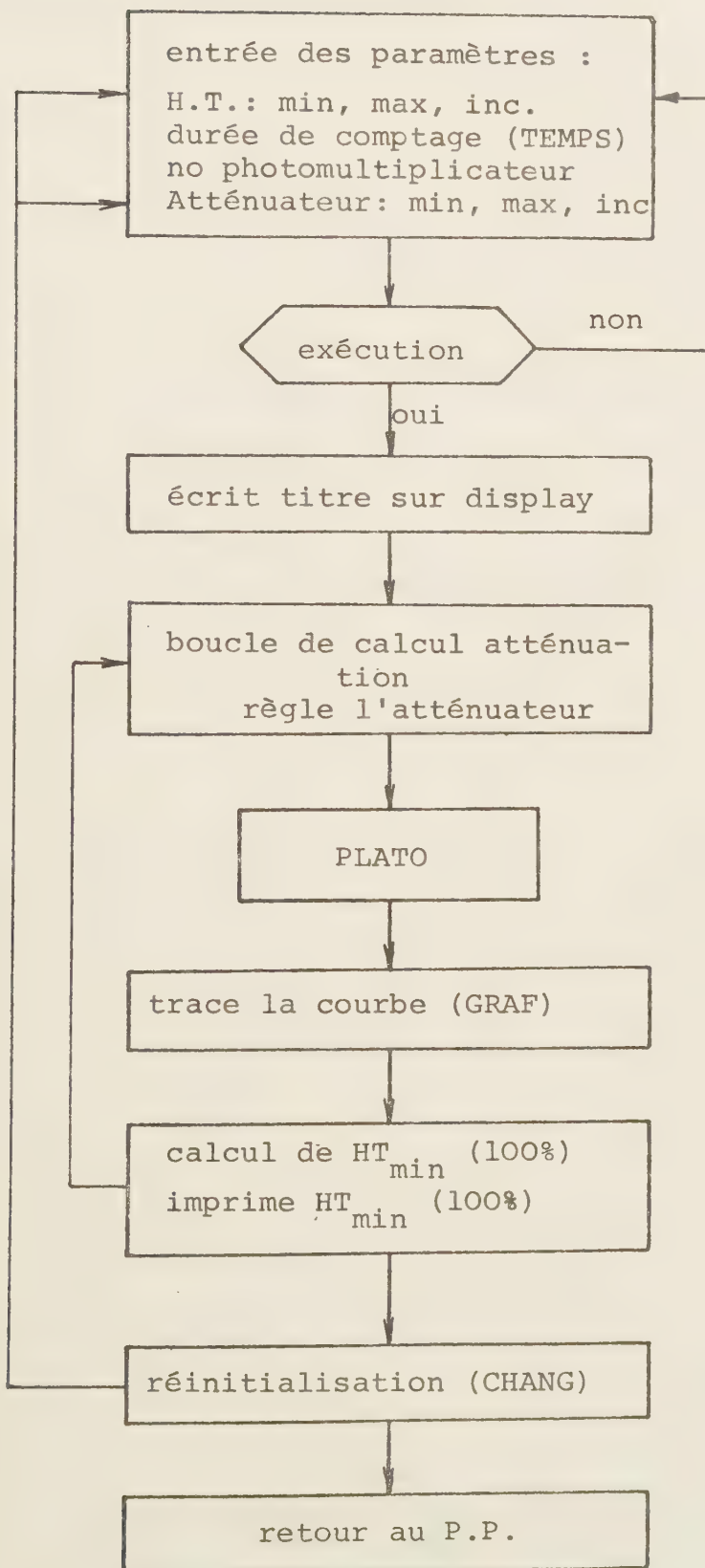
Un programme d'exécution PLATA, dont l'organigramme est reproduit à la figure 6.2., permet de réitérer l'exécution de PLATO en changeant chaque fois la valeur de l'atténuation du signal de diode selon les indications fournies au clavier en début d'exécution.

Programme d'exécution:

PLATA

Sous-programmes

utilisés:



TEMPS : 1 fois

GRAF : m

EPSI : m

CHANG : 1

BETA* : m · n

GAMA* : m (n ou 2n)

*appelés par PLATO

$$m = \text{Att.} \cdot \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

$$n = \text{H.T.} \cdot \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

Sous-programme spécifique:

PLATO

(cf. fig. 5.6. chap. 5)

appelé m fois

Fig. 6.2. Organigramme du programme PLATA pour le relevé d'une famille de "plateaux" de photomultiplicateur avec différentes valeurs de signal de diode.

Le sous-programme de base EPSI permet de trouver pour chaque courbe la valeur minimale de la haute tension pour laquelle l'efficacité de comptage atteint 100%.

Il suffit ensuite de tracer la caractéristique $U_{\text{diode}}^{\text{HT}} / \text{min}$ (100%) pour le photomultiplicateur considéré.

Rappelons que dans le sous-programme PLATO, la position de la clé SW1 commande le relevé de "plateau" avec ou sans déduction du bruit de fond. D'autre part, le sous-programme GRAF permet de superposer les courbes sur l'écran de "display" en gardant une échelle fixe.

6.1.3. Résultats obtenus :

Les figures 5.5 (chap. 5) et 6.4 montrent les familles de plateaux relevées avec 2 photomultiplicateurs de type 56AVP (ancien modèle) pour différentes atténuations du signal de diode. Le photomultiplicateur PM1 est associé à un discriminateur dont le seuil est à 50mV, tandis que celui du PM2 est à 350mV.

D'autre part, les valeurs de la tension de diode ont été choisies en fonction de la zone de réglage des photomultiplicateurs, 0 dB correspondant à $U_{\text{diode}} = 27 \text{ V}$.

Par ailleurs, les caractéristiques mesurées sans déduction du bruit de fond (a), respectivement avec déduction du bruit de fond (b), montrent les valeurs limites HTA, respectivement HTB, de la haute tension à partir desquelles les mesures ne sont

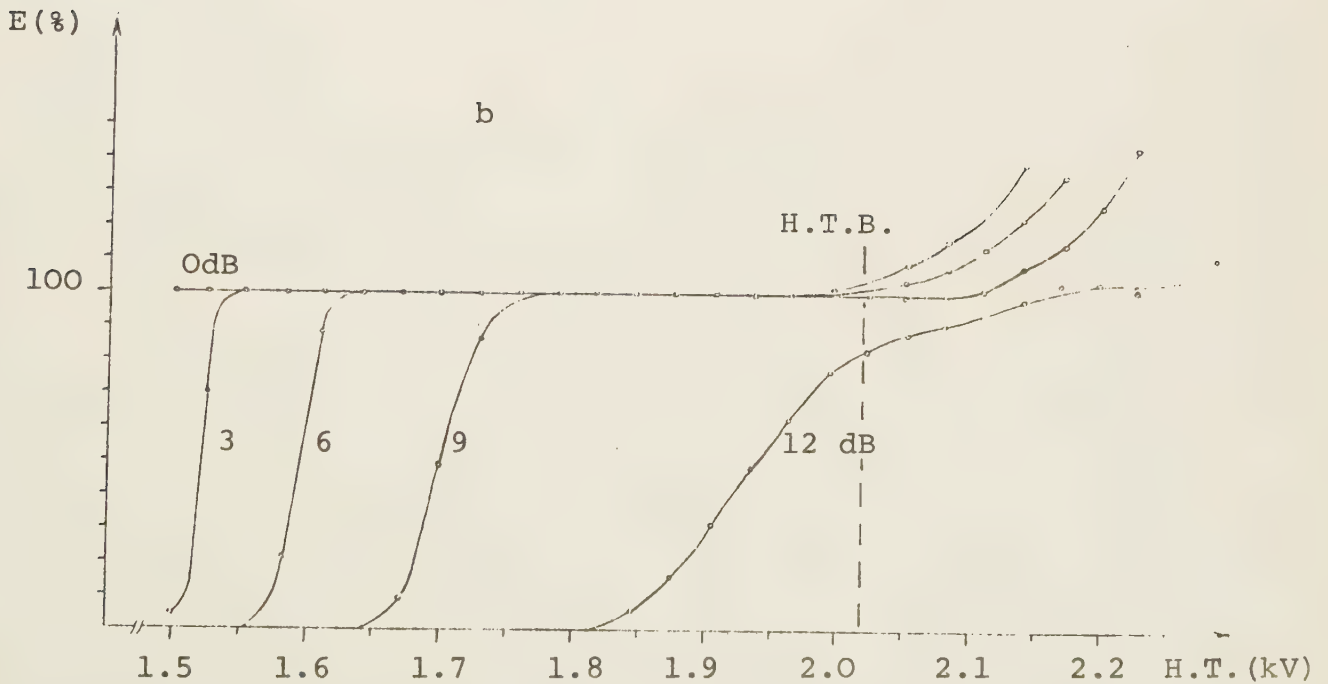
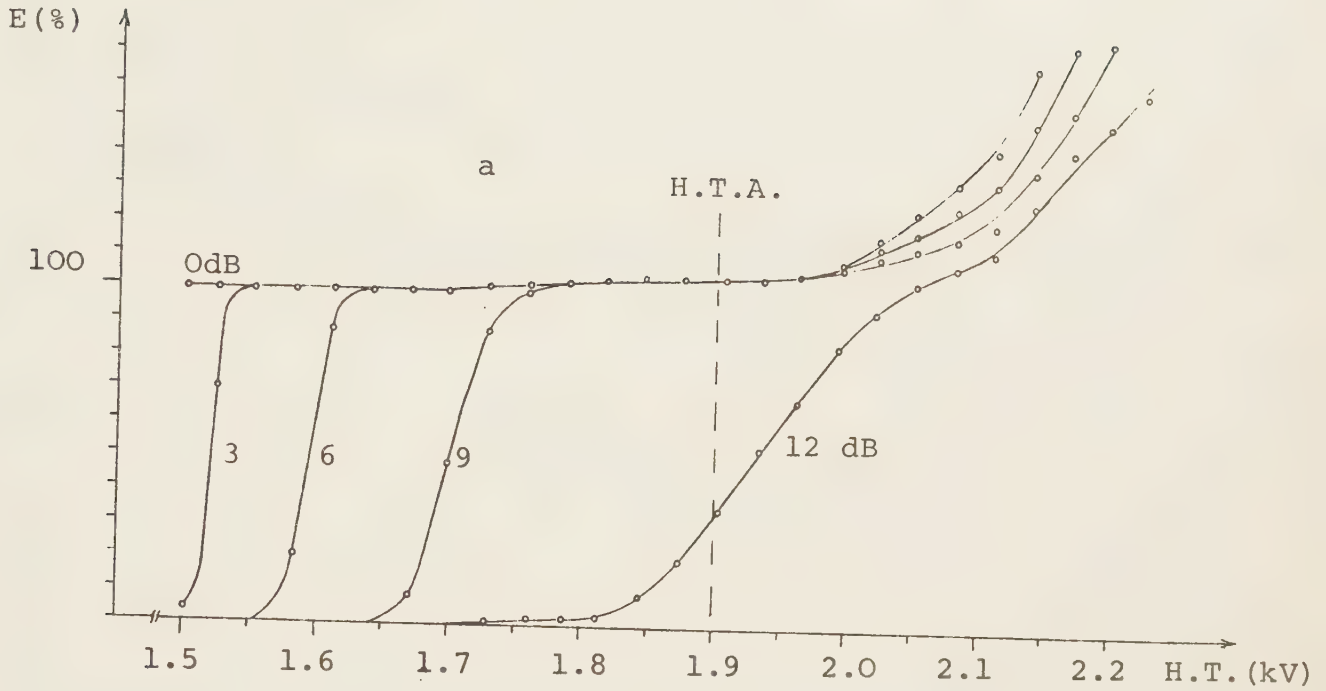


Fig. 6.3. Famille de "plateaux" du photomultiplicateur PM1 pour différentes atténuations du signal de diode
a) sans déduction du bruit de fond
b) avec déduction du bruit de fond

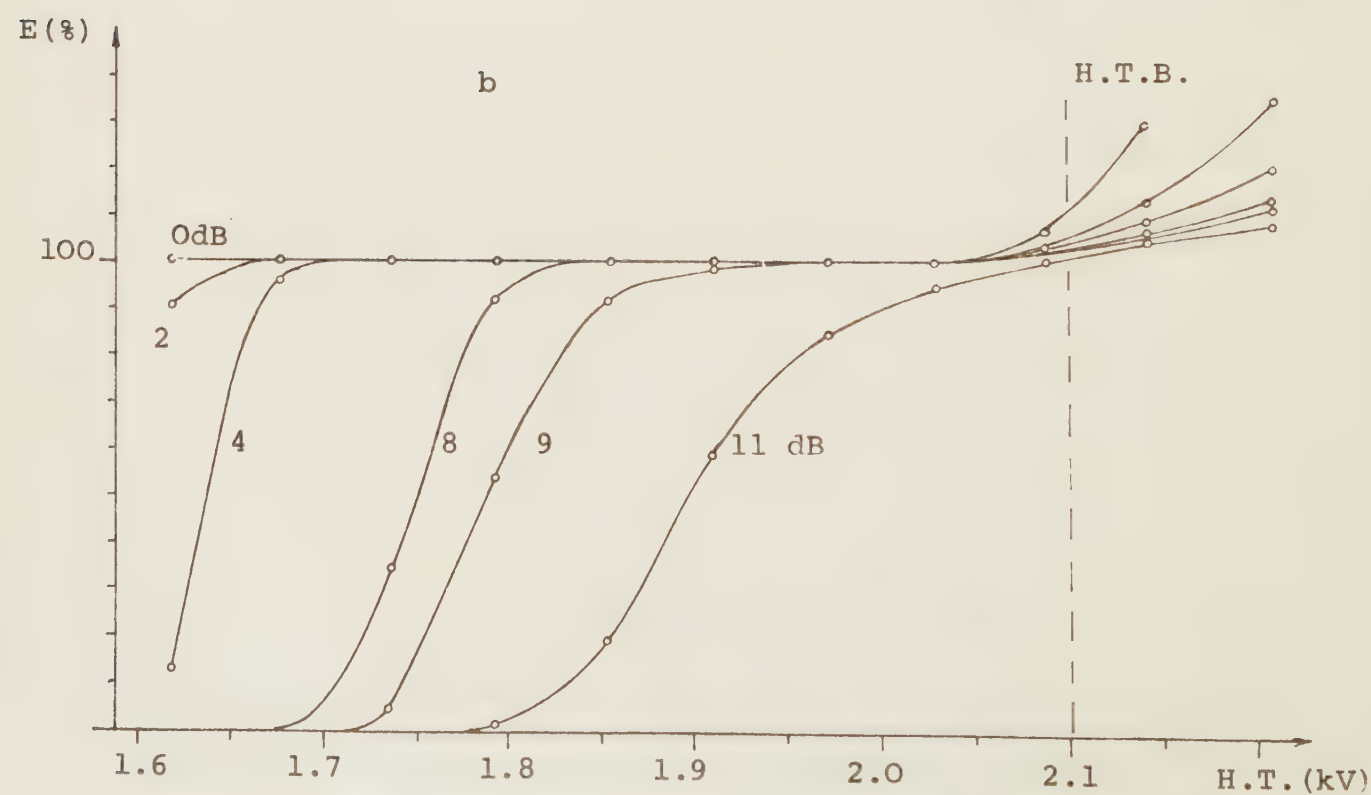
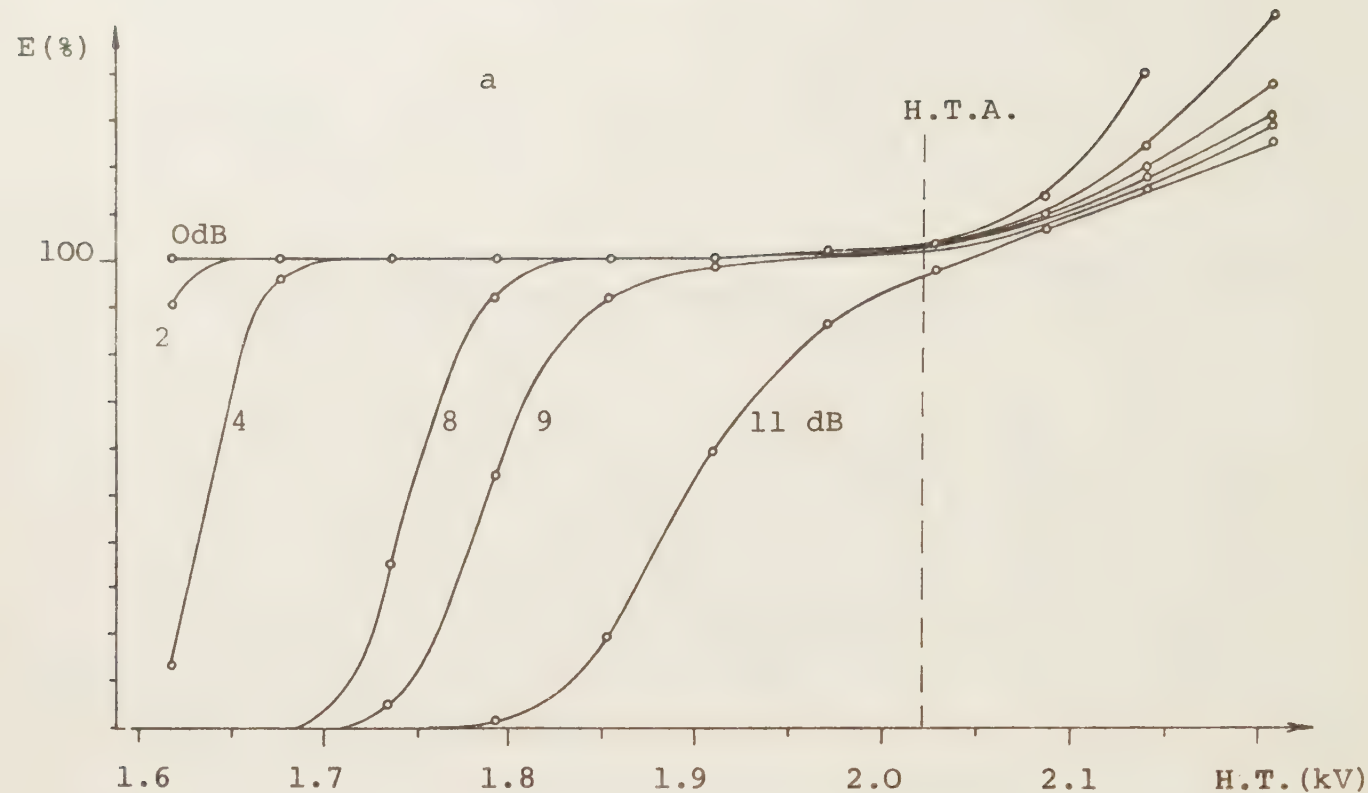


Fig. 6.4. Famille de "plateaux" du photomultiplicateur PM2 pour différentes atténuations du signal de diode
 a) sans déduction du bruit de fond
 b) avec déduction du bruit de fond

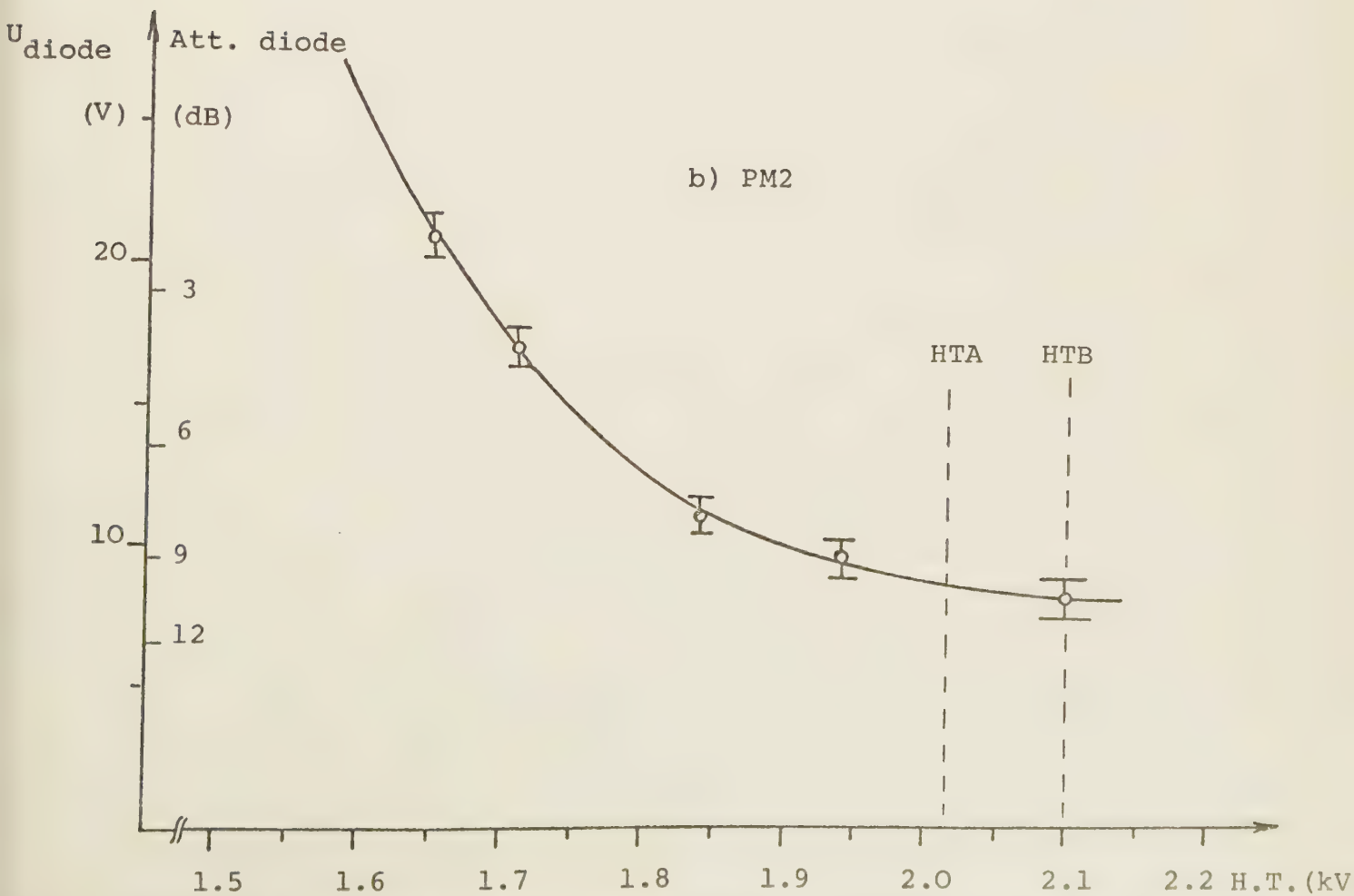
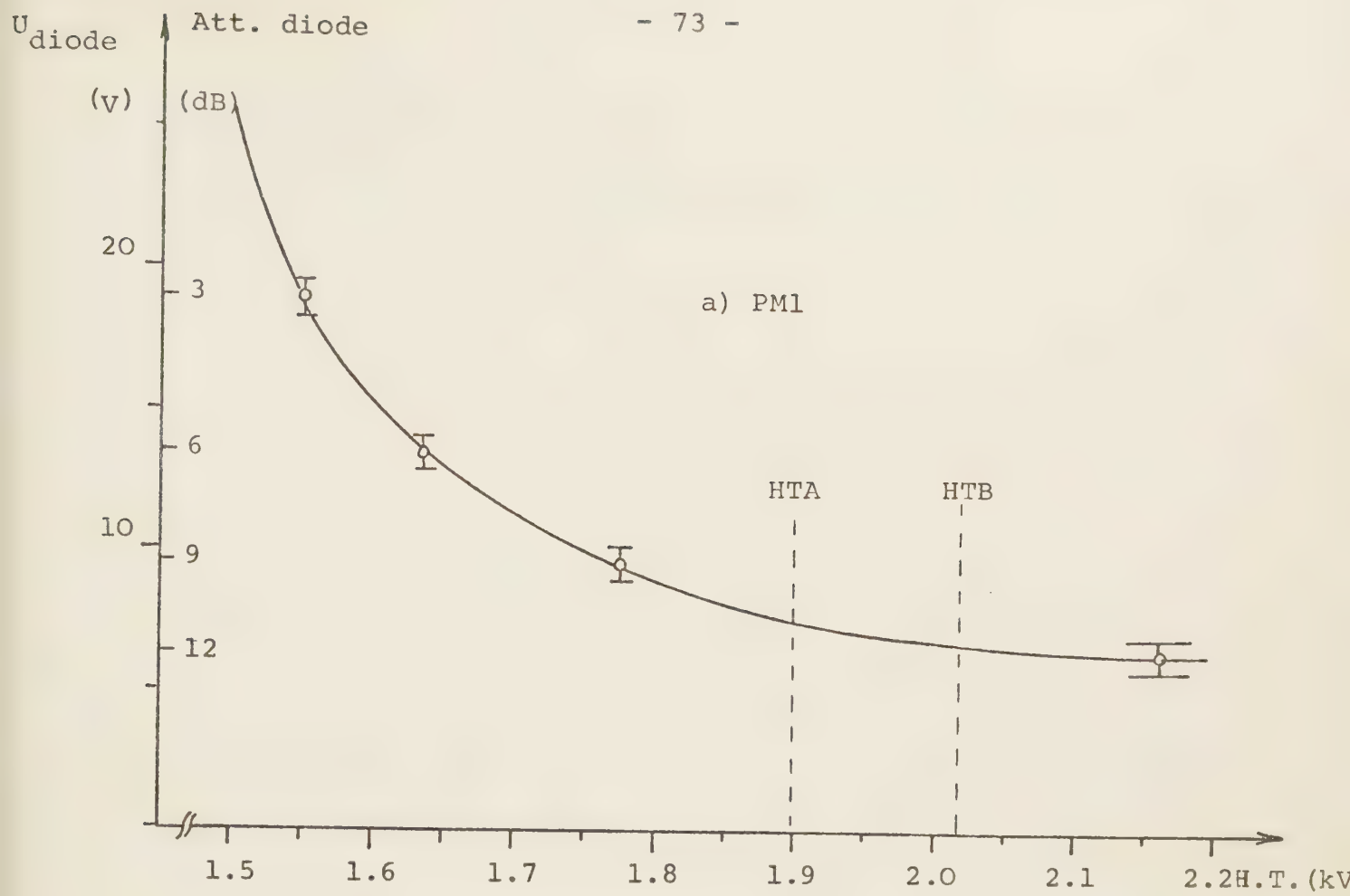


Fig. 6.5. Courbes d'étalonnage H.T._{min.}/U_{diode} pour une efficacité

plus exactes (importance du bruit de fond en absence ou en présence du signal). Il apparaît donc que pour le photomultiplicateur :

PM1 : HTA $\approx$ 1900 V ; HTB $\approx$ 2020 V

PM2 : HTA $\approx$ 2020 V ; HTB $\approx$ 2100 V

Enfin, la figure 6.5 représente les caractéristiques U_{diode} en fonction de $H.T._{\text{min}}$ (100%) pour chacun des photomultiplicateurs, obtenues à partir des "plateaux" relevés avec déduction du bruit de fond. Les valeurs de HTA et HTB sont reportées. Le passage de U_{diode} à l'énergie lumineuse exprimée en eV se fait à l'aide de la figure 6.1.

6.2. Réglage du retard pour assurer la coïncidence entre deux voies de mesure

6.2.1. Présentation du problème

Pour mesurer la corrélation dans le temps entre deux événements, il faut tout d'abord s'assurer que les retards engendrés par chacune des voies de mesure sont bien identiques. Pour cela, on fait une mesure en excitant simultanément les deux détecteurs à l'aide de diodes photoémissives commandées en même temps (fig. 6.6). On règle, par exemple, le retard de la voie 2 à une valeur moyenne, et on mesure le taux de coïncidences C_{12} en fonction du retard T_1 . On obtient une courbe dont l'allure est représentée à la figure 6.7., et on règle T_1 pour avoir le point de fonctionnement au milieu de la "fenêtre". La largeur L de cette fenêtre est égale à la somme des largeurs τ_1 ,

respectivement τ_2 , des impulsions S1 et S2 à la sortie des circuits de mise en forme; en particulier si $\tau_1 = \tau_2 = \tau$; on aura $L = 2\tau$.

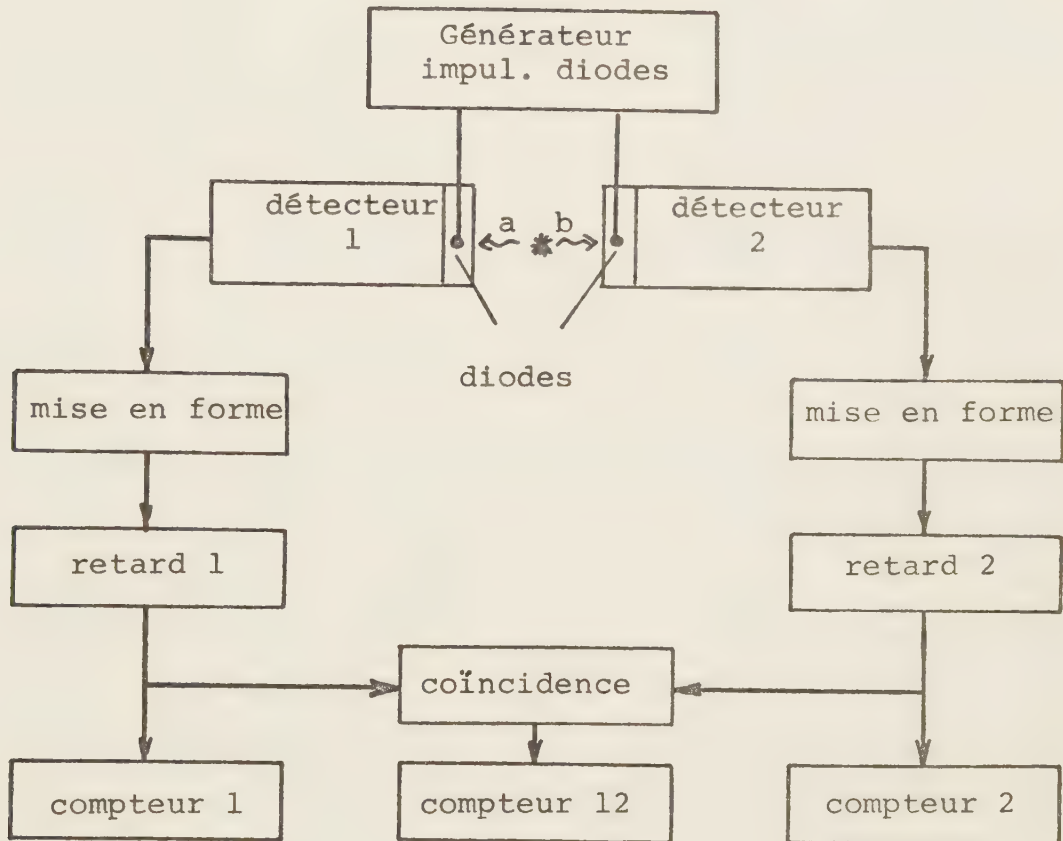


Fig. 6.6. Schéma de principe pour la mesure de la corrélation dans le temps entre deux événements a et b.

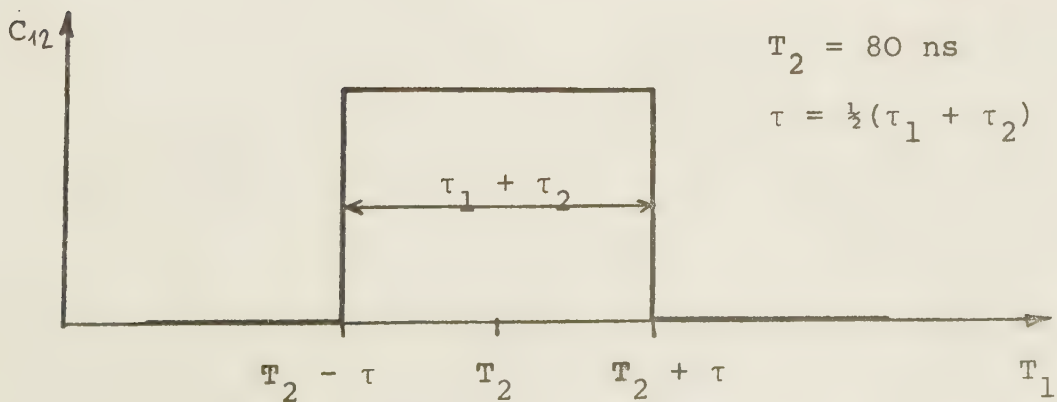
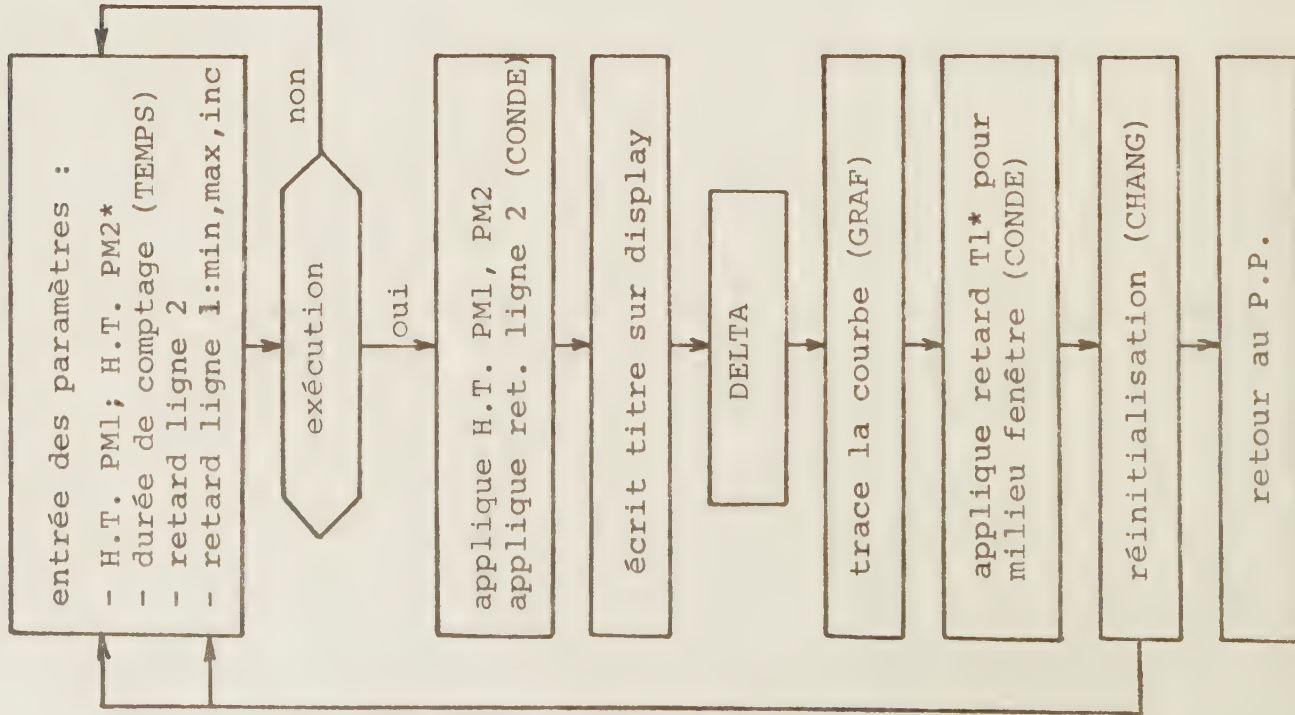


Fig. 6.7 Allure de la courbe de retard

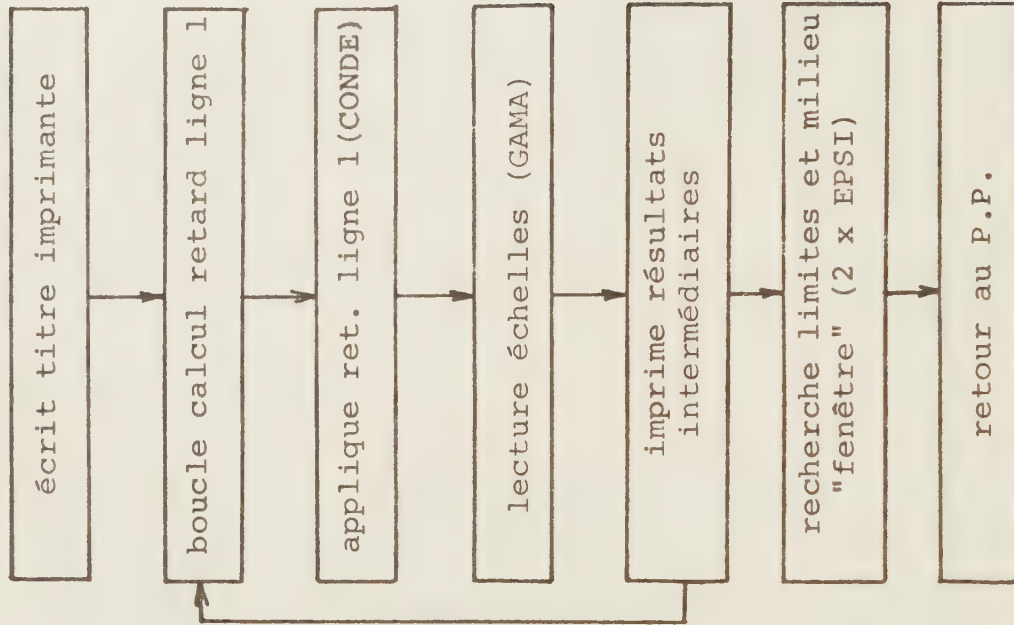
Programme d'exécution:

COIND



Sous-programme spécifique:

DELTA



Sous-programmes de base

utilisés

TEMPS : 1 fois
CONDE : n + 2
GAMA : n
EPSI
GRAF : 1
CHANG : 1

n = nombre de points de mesure

$$= \text{retard} \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

*0 = pas de changement

Fig. 6.8. Organigramme du réglage du retard pour obtenir la coïncidence entre 2 voies de mesure

6.2.2. Programme

Le programme d'exécution COIND dont l'organigramme est reproduit à la figure 6.8 permet de réaliser ce réglage. Organisé selon le même modèle que le programme PLATE décrit au chapitre 5, il utilise, outre de nombreux sous-programmes de base, un sous-programme spécifique DELTA pour le relevé proprement dit de la courbe de retard.

Le point de fonctionnement T_1^* est choisi comme étant égal à

$$T_1^* = \frac{T_1' + T_1''}{2}$$

T_1' et T_1'' étant respectivement le premier et le dernier point pour lesquels l'efficacité de comptage vaut la moitié de l'efficacité maxima mesurée.

6.2.3. Résultats obtenus :

La figure 6.9 montre les courbes de retard relevées avec des signaux de différentes durées.

6.3. Mise en évidence du temps de montée du signal à la sortie du photomultiplicateur

Ce paragraphe est un exemple supplémentaire pour illustrer les nombreuses ressources que fournit la conception modulaire et standard des programmes.

6.3.1. Effet du temps de montée du signal de photomultiplicateur

Le signal recueilli à l'anode du photomultiplicateur a l'allure suivante (fig. 6.10.).

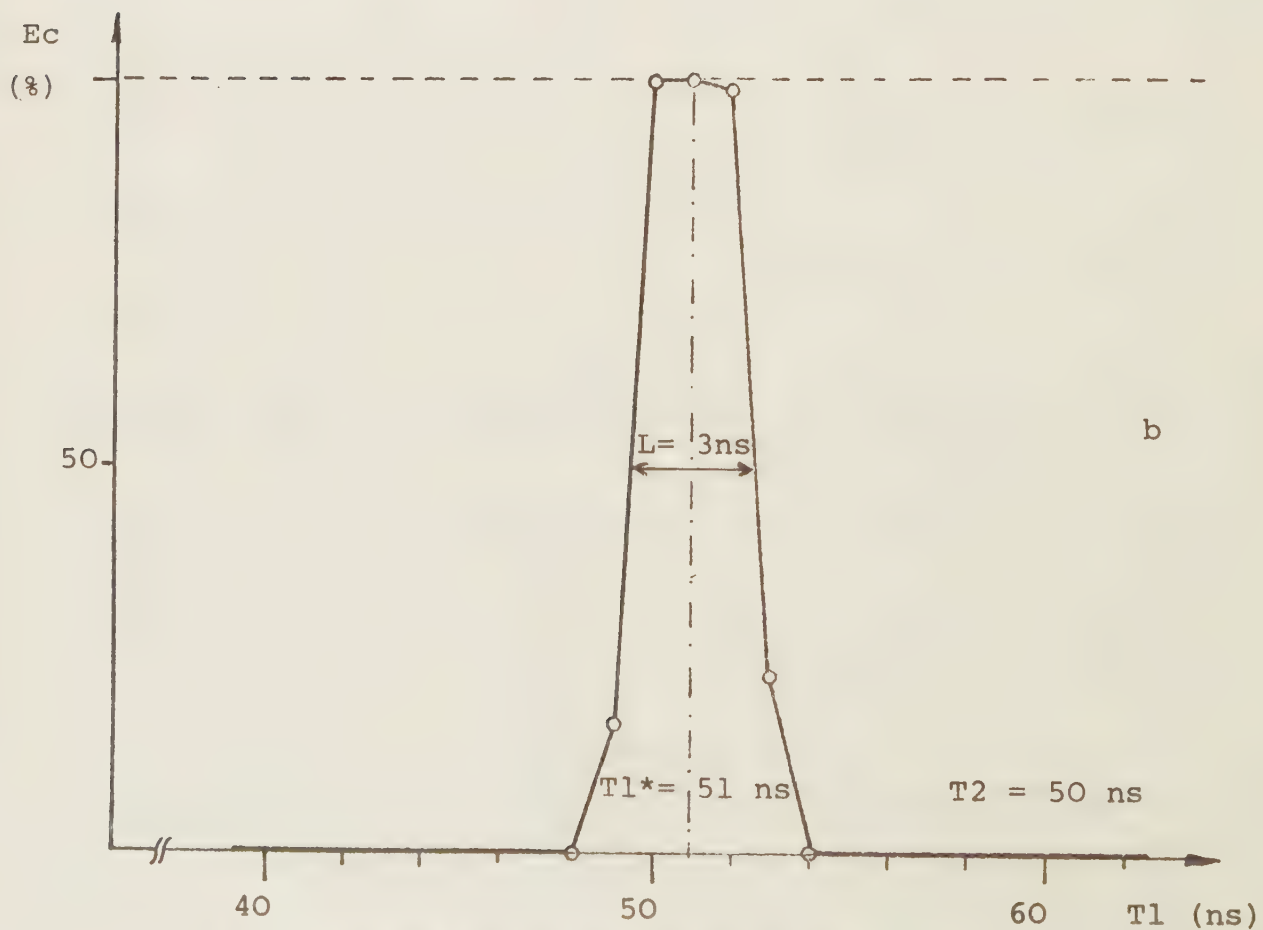
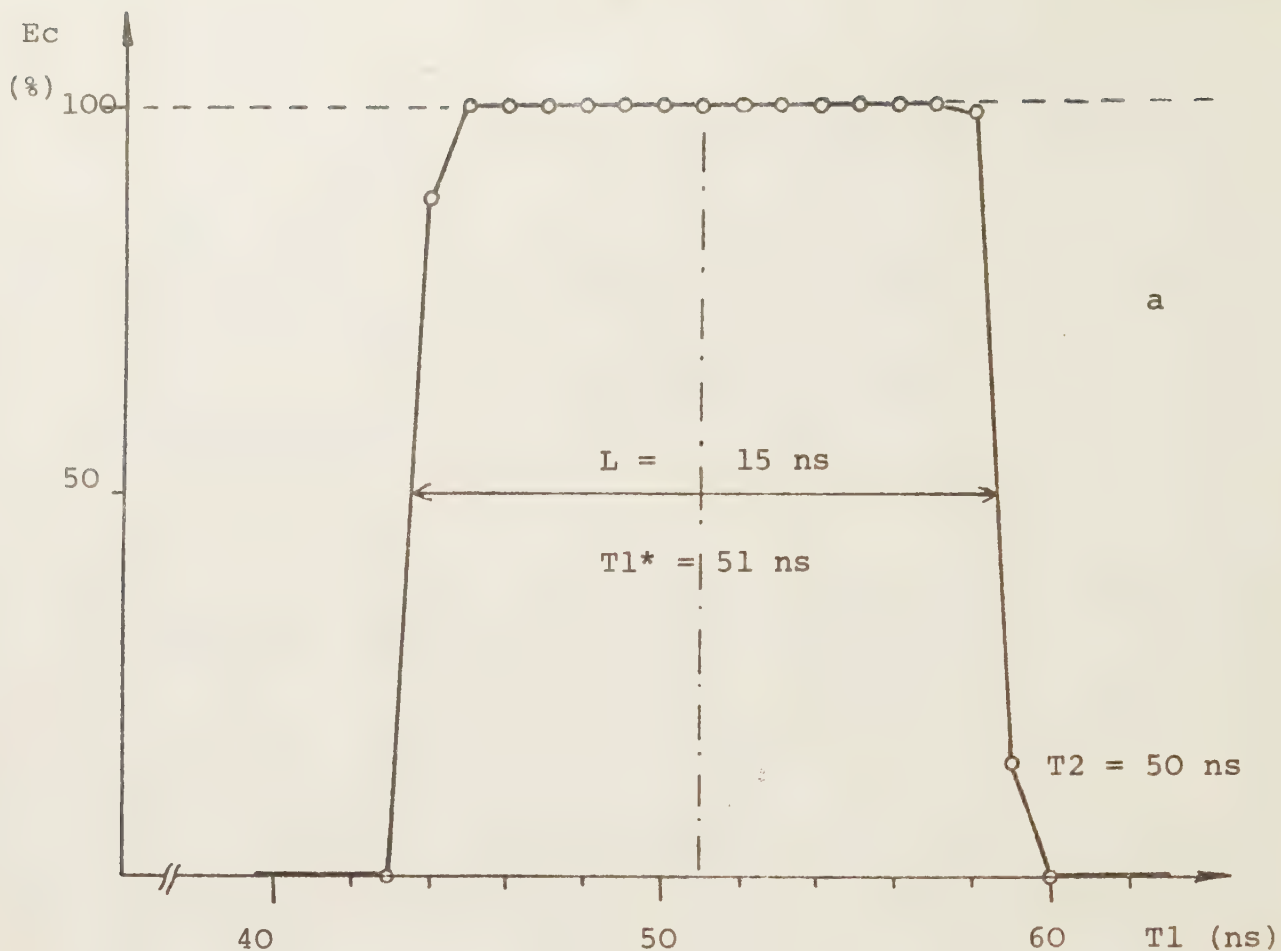


Fig. 6.9. Courbes de coïncidence en fonction du retard de la ligne 1 : a) signaux de 8 ns, b) signaux de 1.5 ns

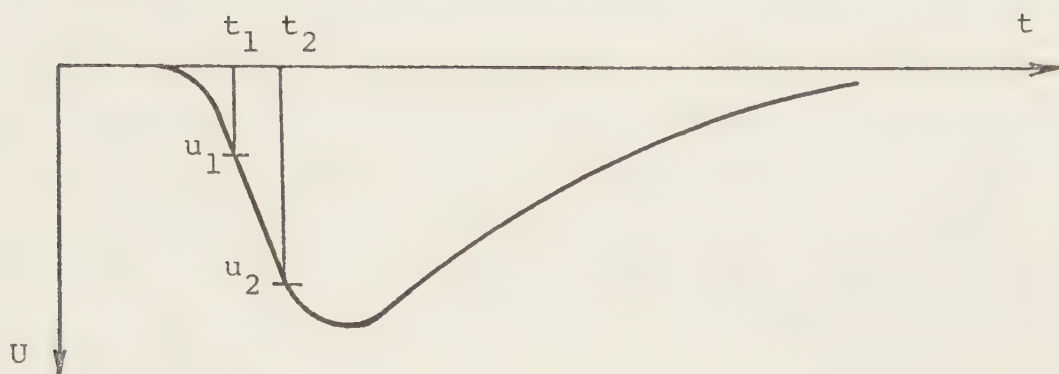


Fig. 6.10 Signal à l'anode d'un photomultiplicateur

L'instant relatif du déclenchement du discriminateur (p. ex. par rapport au max. d'amplitude du signal) dépend du niveau du seuil choisi.

De même, pour un seuil fixe, cet instant dépend du gain du photomultiplicateur, c'est-à-dire de la tension d'alimentation appliquée.

6.3.2. Mise en évidence

En combinant les programmes existants PLATO (relevé de "plateau" de photomultiplicateur, c'est-à-dire mesures pour différentes valeurs de la tension d'alimentation) et DELTA (relevé de courbe de retard), il est facile de faire apparaître le décalage du signal d'anode en fonction de la tension appliquée. Ceci est réalisé par le programme VADEL dont l'organigramme est reproduit à la figure 6.11. La partie encadrée en trait mixte correspond au programme PLATO dans lequel on a remplacé la lecture des échelles par l'appel du sous-programme DELTA.

La figure 6.12 montre le décalage du signal du photomultiplicateur 1 (cf. fig. 6.6) en fonction de sa tension d'alimentation

Programme d'exécution:

VADEL

Sous-programmes de base

utilisés :

entrée des paramètres :

- durée de comptage (TEMPS)
- retard ligne 2
- retard ligne 1: min, max, inc.
- no PM fixe; H.T. fixe
- no PM variable
- H.T.: min, max, inc.

TEMPS : 1 fois

BETA : $n + 1$

CONDE* : $m + 1$

GAMA* : $m \cdot n$

GRAF : 1

*appelés par DELTA

exécution

non

oui

applique tension fixe (BETA)
" retard ligne 2 (CONDE)

écrit titre sur display

boucle calcul H.T.

applique H.T. (BETA)
imprime valeur H.T.

DELTA

imprime retard milieu fenêtre

trace la courbe (GRAF)

réinitialisation

retour au P.P.

Sous-programme spécifique:

DELTA (cf. fig. 6.7)

appelé m fois

m = nombre de courbes

$$= \text{H.T.} \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

n = nombre de points par
courbe

$$= \text{Retard} \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

Fig. 6.11. Organigramme du relevé d'une famille de courbes de retard pour différentes tensions de photomultiplicateur.

par rapport à celui du photomultiplicateur 2 dont la tension reste fixe.

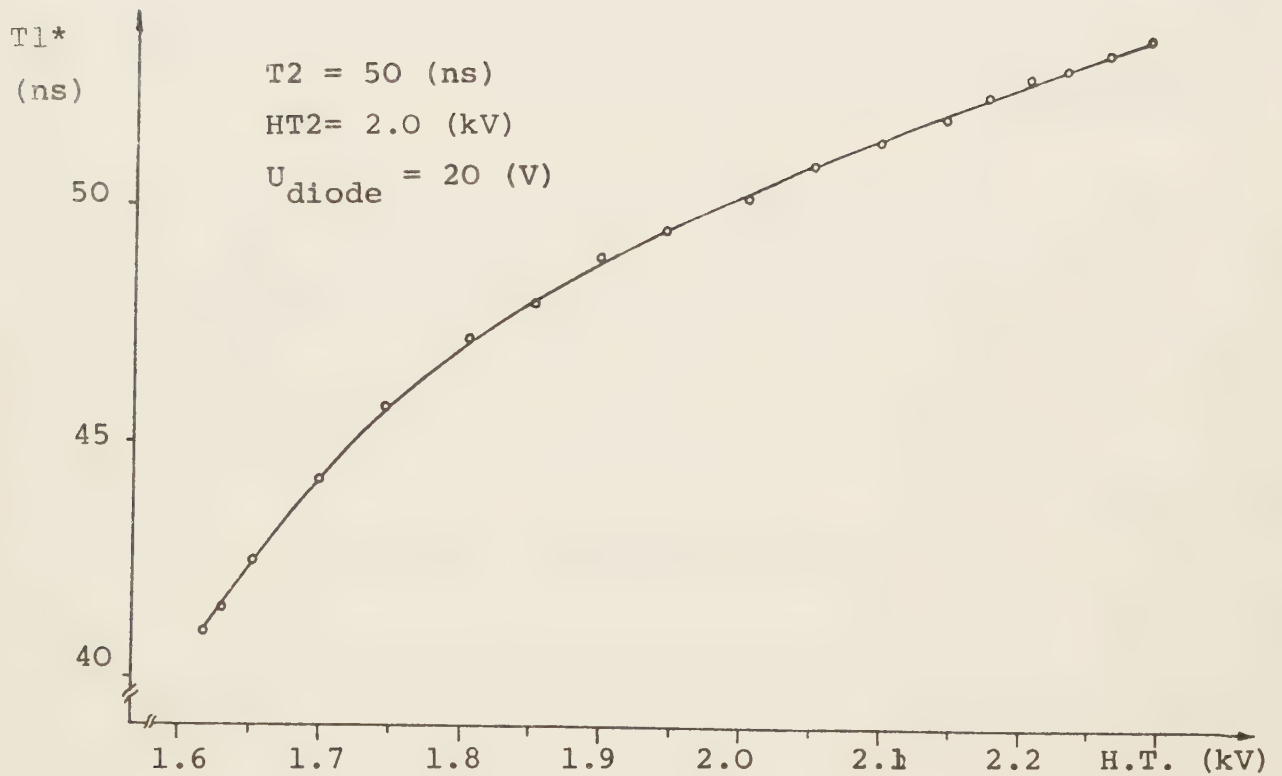


Fig. 6.12. Décalage du signal du photomultiplicateur 1 en fonction de sa tension d'alimentation, par rapport à celui du photomultiplicateur 2.

7. APPLICATION A UNE EXPERIENCE: MESURE DE COINCIDENCE ENTRE LES RAYONS γ D'ANNIHILATION DES POSITRONS D'UNE SOURCE ^{22}Na

7.1. Désintégration du ^{22}Na

Le ^{22}Na se désintègre selon le schéma ci-contre.

Dans 10% des cas, il y a capture électronique, c'est-à-dire qu'un électron du cortège vient dans le noyau, son énergie cinétique étant évacuée par un neutron.

Dans 90% des cas, il y a émission d'un positron β^+ qui, dès qu'il est suffisamment ralenti, s'annihile avec un électron en émettant 2 γ de 0.511 MeV dans des directions opposées pour assurer la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Le noyau se trouve alors à un niveau excité; il rejoint un état stable ($^{22}_{10}\text{Ne}$) en émettant un rayon γ de 1.277 MeV.

L'annihilation ayant lieu dans la source même, il y a finalement émission de

180% de γ à 0.511 MeV, opposés 2 à 2

100% de γ à 1.28 MeV

7.2. Coïncidence $\gamma \gamma$

Le but de l'expérience est de mesurer la corrélation angulaire entre les 2 γ d'annihilation. Pour cela, on dispose deux détecteurs de part et d'autre de la source, comme indiqué à la figure 7.2 et l'on mesure à l'aide d'un circuit de coïncidence, le comptage simultané dans les deux voies, pour différents angles θ .

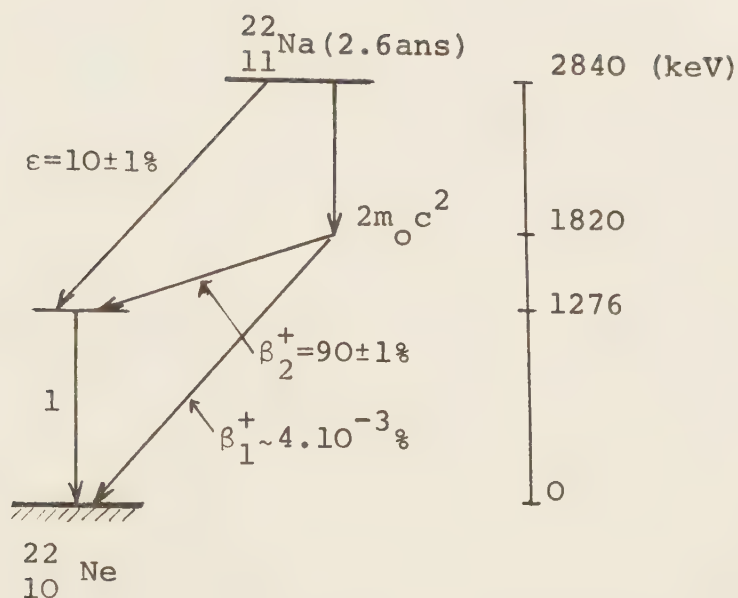


Fig. 7.1. Schéma de désintégration du ^{22}Na

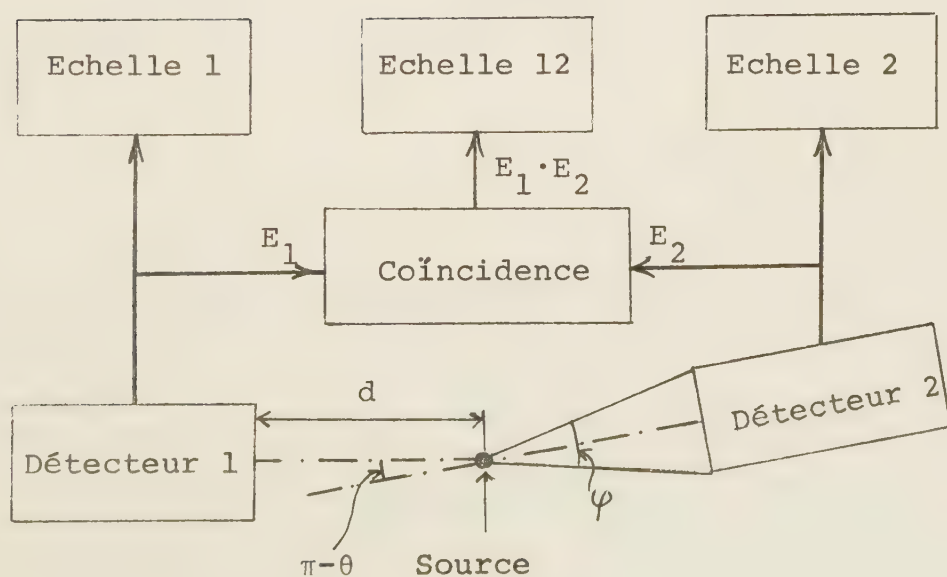


Fig. 7.2. Schéma de principe pour la mesure de la corrélation angulaire des γ d'annihilation

Le nombre N_c de coïncidences mesurées correspond à

$$N_c = N_a + N_f + N_b \quad (7.1)$$

avec N_a = coïncidences réellement dues aux γ d'annihilation

N_f = coïncidences dues essentiellement à celles

entre l'un des γ de 0.511 MeV et le γ de

1.28 MeV émis en même temps; les autres coïnciden-

ces dues à 2 γ émis indépendamment mais avec un

intervalle de temps inférieur au temps de résolu-

tion τ du système de mesure sont beaucoup moins

probables (en effet leur taux de comptage est pro-

portionnel au carré de l'activité de la source x

le temps de résolution avec $\tau \sim 10^{-8}$ sec.).

N_b = coïncidences dues au bruit de fond; mesurées en

plaçant un écran entre la source et l'un des dé-

tecteurs.

Si le temps de résolution du système est très court ($N_b \simeq 0$)

et si l'angle solide des détecteurs est très petit (N_f négli-

geable vis-à-vis de N_a), on peut écrire en première approxi-

mation :

pour $\theta = 180^\circ$: $N_c = N_a$

pour θ très $\neq 180^\circ$: $N_c = N_f$

Soit N_0 l'activité de la source en nombre de désintégrations par seconde.

$\omega = \frac{1}{4\pi}$ x angle solide de chaque détecteur (choisi identique pour les 2 détecteurs) par rapport à la source supposée ponctuelle.

ρ_1, ρ_2 les efficacités de comptage des détecteurs 1, respectivement 2, pour les γ de 0.511 MeV

ρ'_1, ρ'_2 idem pour les γ de 1.28 MeV.

Les comptages des différentes voies s'écrivent alors :

$$\text{Echelle 1 : } N_1 = N_o \omega \cdot (1.8 \rho_1 + \rho_1') \quad (7.2)$$

$$\text{Echelle 2 : } N_2 = N_o \omega (1.8 \rho_2 + \rho_2') \quad (7.3)$$

Echelle 12:

$$\theta = 180^\circ \quad N_a = 1.8 N_o \omega \rho_1 \rho_2 \quad (7.4)$$

$$\theta = 90^\circ \quad N_f = 0.9 N_o \omega^2 (\rho_1 \rho_2' + \rho_2 \rho_1') \quad (7.5)$$

Si on admet une symétrie de fonctionnement dans les 2 voies, c'est-à-dire

$$\frac{\rho_1'}{\rho_1} = \frac{\rho_2'}{\rho_2} = \alpha \quad (7.6)$$

alors

$$\frac{N_f}{N_a} = \omega \alpha$$

d'où l'on tire

$$\alpha = \frac{1}{\omega} \frac{N_f}{N_a} \quad (7.7)$$

Pour un détecteur donné, l'angle solide qu'il présente par rapport à la source est inversement proportionnel au carré de sa distance, soit $\omega \sim 1/d^2$. Il ressort des expressions ci-dessus que

$$\begin{aligned} N_1 &\sim d^{-2} \\ N_2 &\sim d^{-2} \\ N_a &\sim d^{-2} \\ N_f &\sim d^{-4} \end{aligned} \quad (7.8)$$

D'autre part, nous avons

$$N_c(\theta) = N_b + N_f + N_a(\theta)$$

$$\text{avec } N_a(\theta) = 1.8 N_o \omega_a(\theta) \rho_1 \rho_2 = \text{cte} \cdot \omega_a(\theta) \quad (7.9)$$

où ω_a représente la partie de l'angle solide du détecteur qui participe à la coïncidence, soit :

$$\omega_a(\theta) = \begin{cases} \omega(-|\pi-\theta|) & \text{pour } |\pi-\theta| \leq \varphi \\ 0 & \text{pour } |\pi-\theta| > \varphi \end{cases} \quad (7.10)$$

φ étant l'angle d'ouverture du détecteur par rapport à la source, dans le plan où est défini θ .

Si les 2 γ d'annihilation sont émis exactement à 180° l'un par rapport à l'autre, la caractéristique $N_a(\theta)$ aura donc l'allure suivante :

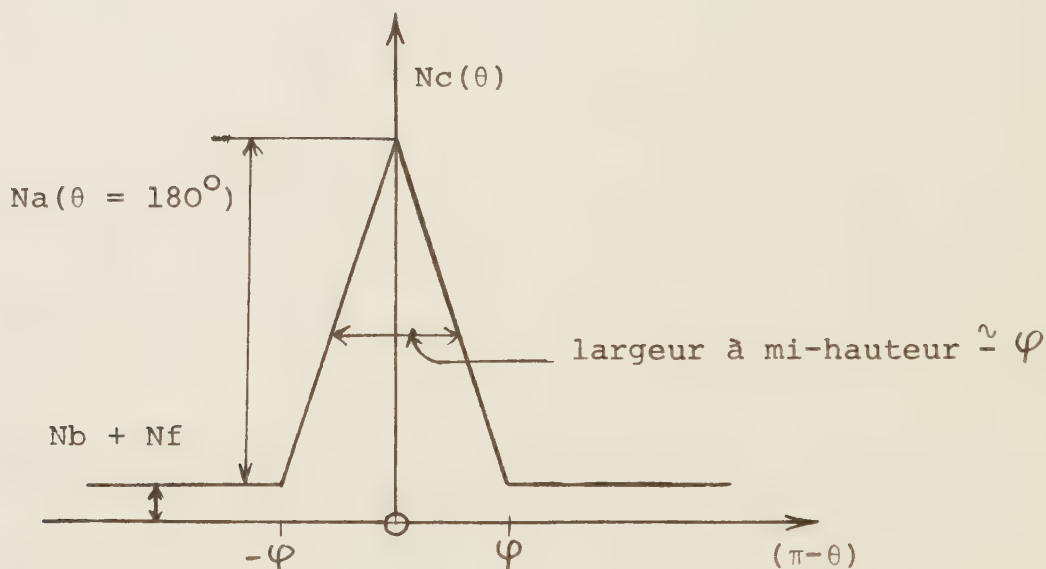


Fig. 7.3. Allure théorique de $N_c(\theta)$ pour des γ émis exactement à 180° .

Cependant la théorie (14) montre que si le positron est thermalisé avant de réagir avec l'électron, ce dernier a une impulsion non nulle, au max $= \sqrt{2m_0 E_F}$, E_F étant l'énergie de Fermi du métal considéré. Ceci a pour conséquence d'arrondir le sommet de la caractéristique qui tend à devenir une parabole entre $\theta = 180^\circ \pm \varepsilon$, avec par exemple $\varepsilon \approx 0.25^\circ$ pour $E_F = 5$ eV.

7.3. Description du montage utilisé

Le but de cette expérience n'est pas la mesure très précise de la corrélation angulaire qui permettrait, par exemple, de déduire l'énergie de Fermi du matériel contenant la source, mais plutôt de montrer l'application de la commande automatique à ce type de mesures. L'effort est donc porté sur la méthode de mesure et non sur la précision. En effet, le matériel utilisé est très simple. Une vue du dispositif de montage de la source radioactive et des détecteurs est reproduite à la figure 7.4

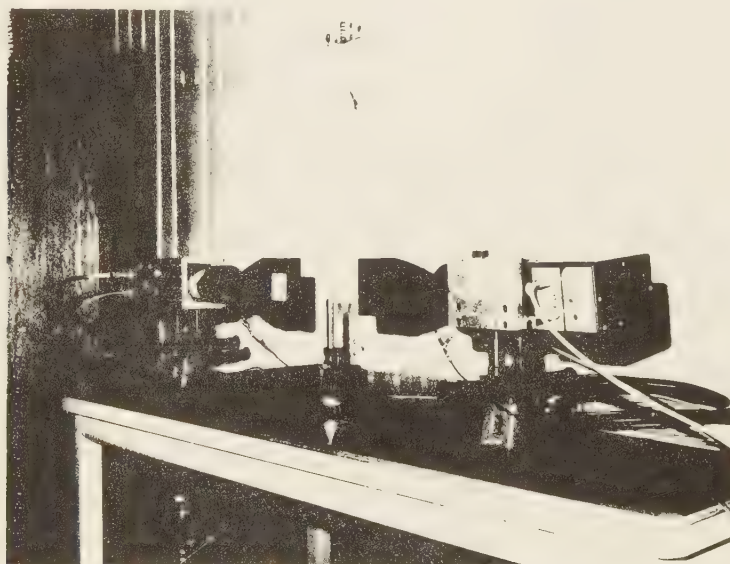


Fig. 7.4. Vue du montage de la source et des deux détecteurs

Nous avons fait les mesures avec une source ^{22}Na de $10\mu\text{Ci}$ (Amersham, Gamma référence source, type SKR. 151) qui se présente sous forme d'une perle de 1 mm de diamètre montée dans un support plastique entre deux fenêtres de polystyrène transparent. Des mesures avec et sans un écran d'aluminium de 1.5 mm d'épaisseur ont montré que toute l'annihilation avait lieu à l'intérieur de la source. Nous avons donc utilisé

la source sans écran de façon à pouvoir la considérer comme ponctuelle.

La figure 7.4 montre les deux rails optiques avec échelle graduée sur lesquels sont fixés les détecteurs (scintillateur associé à un photomultiplicateur), ainsi que la source montée sur un support autour duquel pivotent les deux rails l'un par rapport à l'autre, l'angle étant repéré à l'aide d'un vernier. Différents réglages permettent en outre d'aligner les détecteurs sur l'axe du rail correspondant (± 1 mm) et d'ajuster la hauteur par rapport à la source et à l'autre détecteur (± 1 mm). La distance d entre le centre du scintillateur et la source est mesurée ± 1 mm. L'angle θ est repéré $\pm 6'$ en valeur relative, la valeur absolue étant définie à seulement $\pm 1^\circ$; ceci est moins important car nous savons à priori que la courbe de coïncidence en fonction de θ est symétrique par rapport à $\theta = 180^\circ$.

Nous avons choisi des scintillateurs plastiques malgré leur mauvais rendement pour la détection des γ , en raison de leur rapidité de réponse afin d'avoir une bonne résolution en temps pour les mesures de coïncidence. D'autre part, pour que le temps de mesure ne dépasse pas quelques dizaines de secondes par point, nous avons pris des scintillateurs de dimensions relativement importantes, soit :

hauteur $h = 100$ mm

largeur $\ell = 10$ mm

longueur $L = 100$ mm

Pour des raisons de simplification de montage, nous n'avons pas mis de collimateur pour définir l'angle solide du détecteur. Etant donné les dimensions du scintillateur utilisé, on peut montrer qu'une bonne approximation consiste à considérer l'angle solide défini par la section du scintillateur 1 cm en avant de son centre. Or nous avons défini la distance d de la source par rapport au centre de gravité du scintillateur.

Nous avons donc, si d est exprimé en cm :

l'angle solide du détecteur :

$$\Omega = \frac{h \cdot \ell}{(d-1)^2} = \frac{10}{(d-1)^2} \text{ rad} \quad (7.11)$$

d'où

$$\omega = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{0.796}{(d-1)^2} \quad (7.12)$$

l'angle d'ouverture :

$$\varphi = \text{arc tg } \ell/(d-1) = \text{arc tg } 1/(d-1) \quad (7.13)$$

Par ailleurs, toute l'électronique utilisée est la même que celle décrite au chapitre 6.

7.4. Choix du point de fonctionnement des photomultiplicateurs

7.4.1. Efficacité des scintillateurs

Le nombre des rayons γ faisant une interaction avec le scintillateur est déterminé par

$$I = I_0 (1 - e^{-\mu L}) \quad (7.14)$$

où I_0 = nombre de γ incidents

μ = coefficient d'absorption linéaire du scintillateur

L = longueur du scintillateur

Dans le scintillateur plastique, pour les énergies considérées, l'effet Compton est prépondérant avec des valeurs de μ respectivement (cf. tables de Wight pour le carbone; $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) :

$$\mu (0.511 \text{ MeV}) = 0.0863 \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu (1.28 \text{ MeV}) = 0.0570 \text{ cm}^{-1}$$

Ce qui donne, avec $L = 10 \text{ cm}$:

$$I (0.511 \text{ MeV}) = 0.58 I_0$$

$$I (1.28 \text{ MeV}) = 0.44 I_0$$

L'énergie cédée au scintillateur par effet Compton par le rayon γ a un spectre continu dont la valeur maxima est

$$E_{\text{max}}^C = \frac{4 E \gamma^2}{1 + 4 E \gamma} \quad (\text{MeV}) \quad (\text{correspond au recul du photon incident})$$

$$\text{soit } E_{\text{max}}^C (0.511 \text{ MeV}) = 0.343 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{max}}^C (1.28 \text{ MeV}) = 1.07 \text{ MeV}$$

D'autre part, pour chaque rayon γ qui a fait une interaction en perdant une énergie E dans le scintillateur, il y a émission de J photons lumineux avec

$$J = \frac{E}{\varepsilon} \cdot \eta \quad (.7.15)$$

où ε = énergie moyenne d'un photon lumineux

$$(\approx 3 \text{ eV pour } \lambda = 4000 \text{ Å})$$

η = rendement lumineux du scintillateur

(de l'ordre de 1 à 2% pour le scintillateur plastique)

A cela il faut ajouter un facteur Ω qui tient compte des défauts de collection de lumière jusqu'à la cathode du photomultiplicateur. Dans notre cas, nous pouvons estimer Ω de l'ordre de 30 à 40 %, moins 5 % pour tenir compte de la diode photoémissive logée dans le guide de lumière (cf. chap. 2, § 2.7), soit $\Omega \approx 0.3$.

D'où le nombre moyen de photons reçus par la photocathode pour chaque interaction :

$$J_O \approx 1.5 \cdot E_{(\text{eV})} \quad (\pm 50 \% \text{ près})$$

ce qui donne pour les γ :

$$\begin{aligned} \text{de } 0.511 \text{ MeV} : J_O (\text{photoélectrique}) &= 770 \text{ photons soit } 2.6 \text{ keV} \\ J_{O \text{ max}} \text{ Compton} &= 520 \text{ photons soit } 1.7 \text{ keV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{de } 1.28 \text{ MeV} : J_O (\text{photoélectrique}) &= 2000 \text{ photons soit } 6.4 \text{ keV} \\ J_{O \text{ max}} \text{ Compton} &= 1600 \text{ photons soit } 5.3 \text{ keV} \end{aligned}$$

7.4.2. Choix des hautes tensions

Si on se reporte à la caractéristique de la diode XP21 (fig. 6.1 chap. 6), on trouve les tensions de diode qui correspondent aux mêmes énergies lumineuses, soit

$$\begin{array}{ll} \text{pour } 2 \text{ à } 4 \text{ keV} & : U_{\text{diode}} = 8 \text{ à } 10 \text{ V} \\ 5 \text{ à } 7 \text{ keV} & : U_{\text{diode}} = 15 \text{ à } 17 \text{ V} \end{array}$$

Les courbes d'étalonnage des photomultiplicateurs en fonction de la tension d'impulsion sur la diode (fig. 6.5) indiquent les tensions d'alimentation min. nécessaires pour avoir une efficacité de comptage de 100%, soit :

$$\begin{array}{ll} \text{pour } 2 \text{ à } 4 \text{ keV} : \text{HT1} = 1.75 \text{ à } 1.84 \text{ kV} & \\ & \text{HT2} = 1.9 \text{ à } 2.1 \text{ kV} \\ 5 \text{ à } 7 \text{ keV} : \text{HT1} = 1.56 \text{ à } 1.60 \text{ kV} & \\ & \text{HT2} = 1.17 \text{ à } 1.75 \text{ kV} \end{array}$$

Or les valeurs des énergies considérées correspondent aux maxima des spectres, donc pour détecter la plus grande partie des interactions il faudrait des tensions plus élevées.

Cependant, le choix est limité par les valeurs HTA ou HTB selon que l'on déduit ou non le bruit de fond des mesures. Au-delà de ces tensions, les valeurs absolues des comptages sont perturbées par le bruit de fond, d'autant plus que celui-ci ne peut pas être mesuré en cours d'expérience car nous n'avons pas de moyen pratique pour isoler la source pour chaque point de mesure. Le bruit de fond doit donc être mesuré préalablement en fonction de la tension et mémorisé pour être

déduit ensuite des mesures. Sa valeur peut varier entre-temps. Il est donc préférable de travailler dans une zone où le bruit reste si possible négligeable par rapport au taux de comptage attendu.

La source utilisée ayant une activité nominale N_0 de 10 μCi , soit $3.7 \cdot 10^5$ désintégrations par seconde, le taux de comptage max. attendu, pour une distance d de 20 cm est d'après (7.2) :

$$N_{\text{max}} = N_0 \omega (1.8 \cdot \rho_{\text{max}} + \rho'_{\text{max}})$$

$$\text{avec } \rho_{\text{max}} = 0.58 \text{ et } \rho'_{\text{max}} = 0.44$$

$$\text{d'où } N_{\text{max}} \sim 1200 \text{ c/s}$$

soit environ la moitié de la fréquence de la diode. Le bruit de fond sera donc proportionnellement deux fois plus important.

Les figures 7.5 a) et 7.6 a) reproduisent les "plateaux" de chacun des deux photomultiplicateurs en comptage simple mesurés pour différentes distances de source. Une mesure en absence de source a servi à enregistrer la caractéristique de bruit de fond, permettant ainsi de calculer les courbes sans bruit de fond reproduites aux fig. 7.5 b) et 7.6 b).

Les courbes N_1 et N_2 en fonction de d pour des tensions inférieures au seuil de bruit de fond (fig. 7.7) montrent un bon accord avec la loi $\sim d^{-2}$.

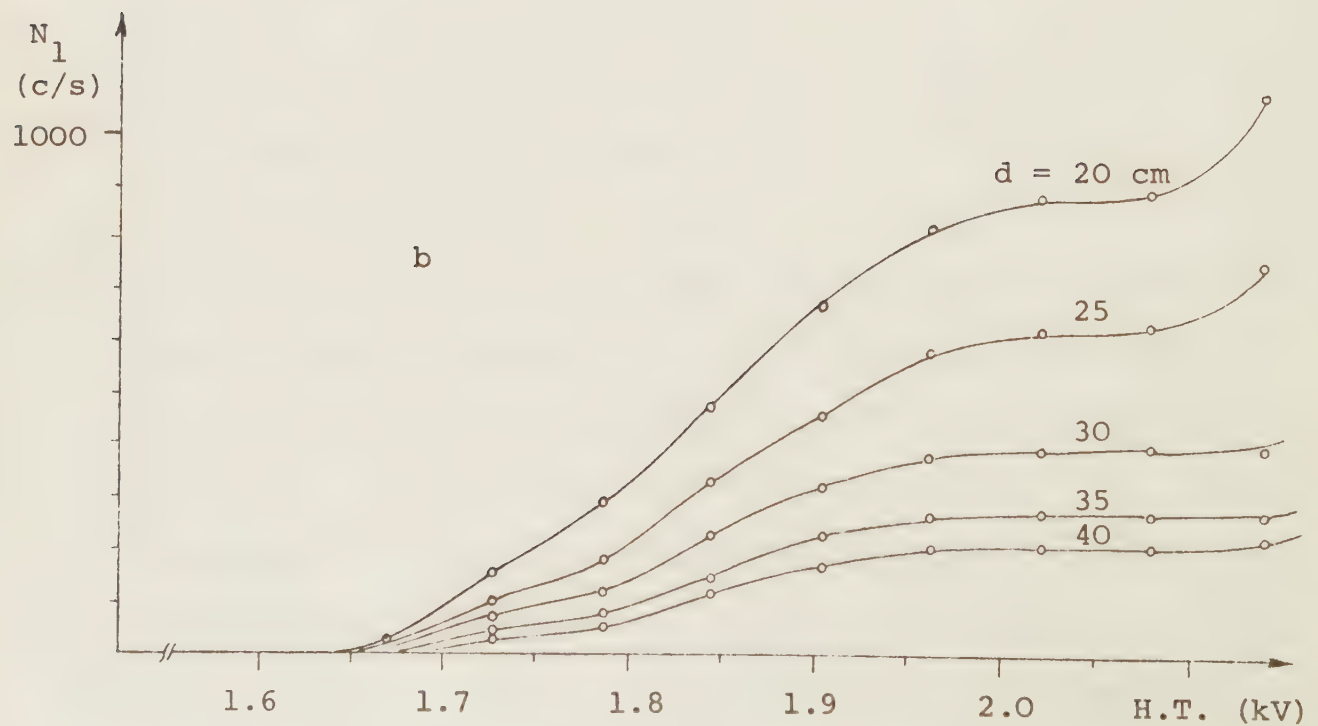
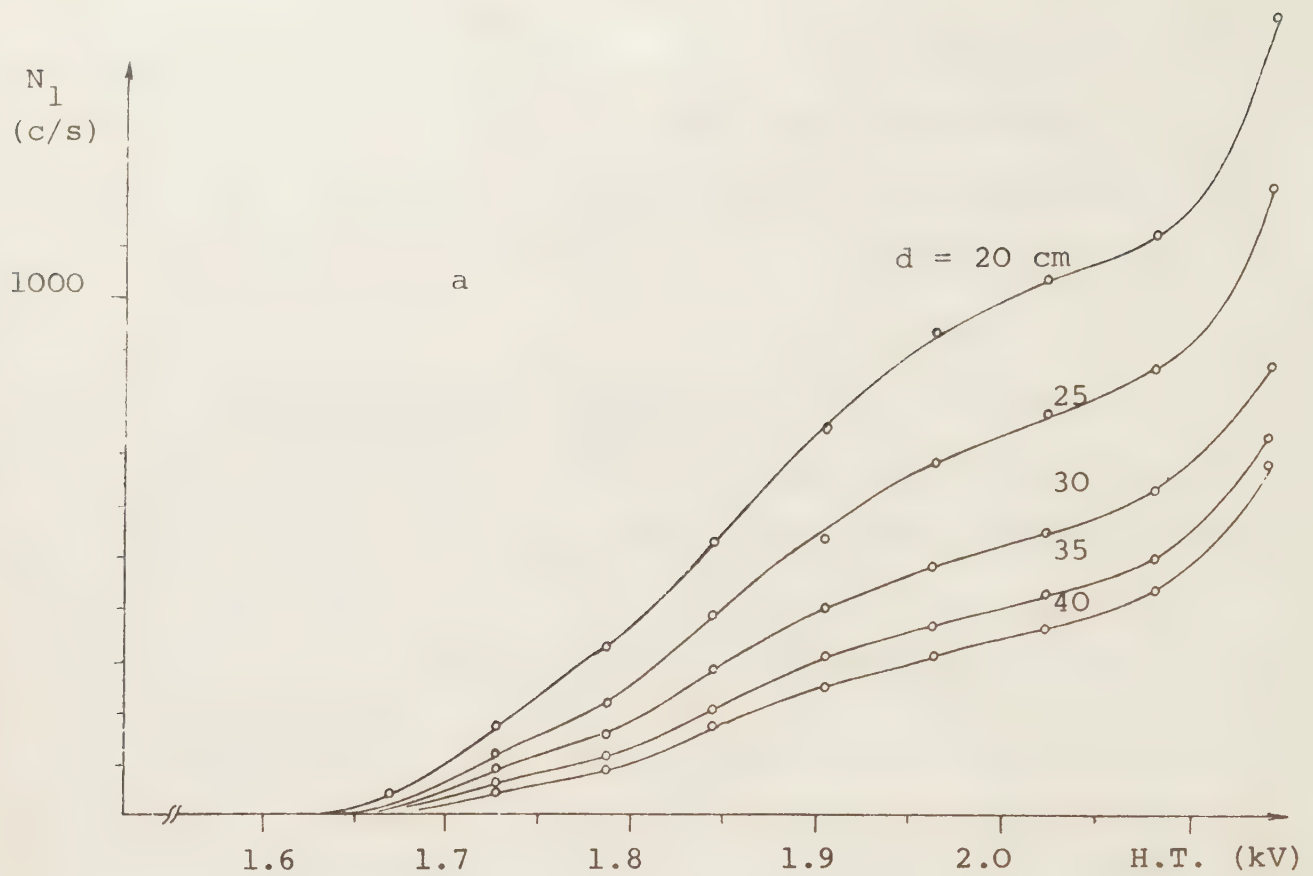


Fig. 7.5. Famille de "plateaux" du photomultiplicateur PM1 pour différentes distances de la source
 a) avec bruit de fond
 b) sans bruit de fond

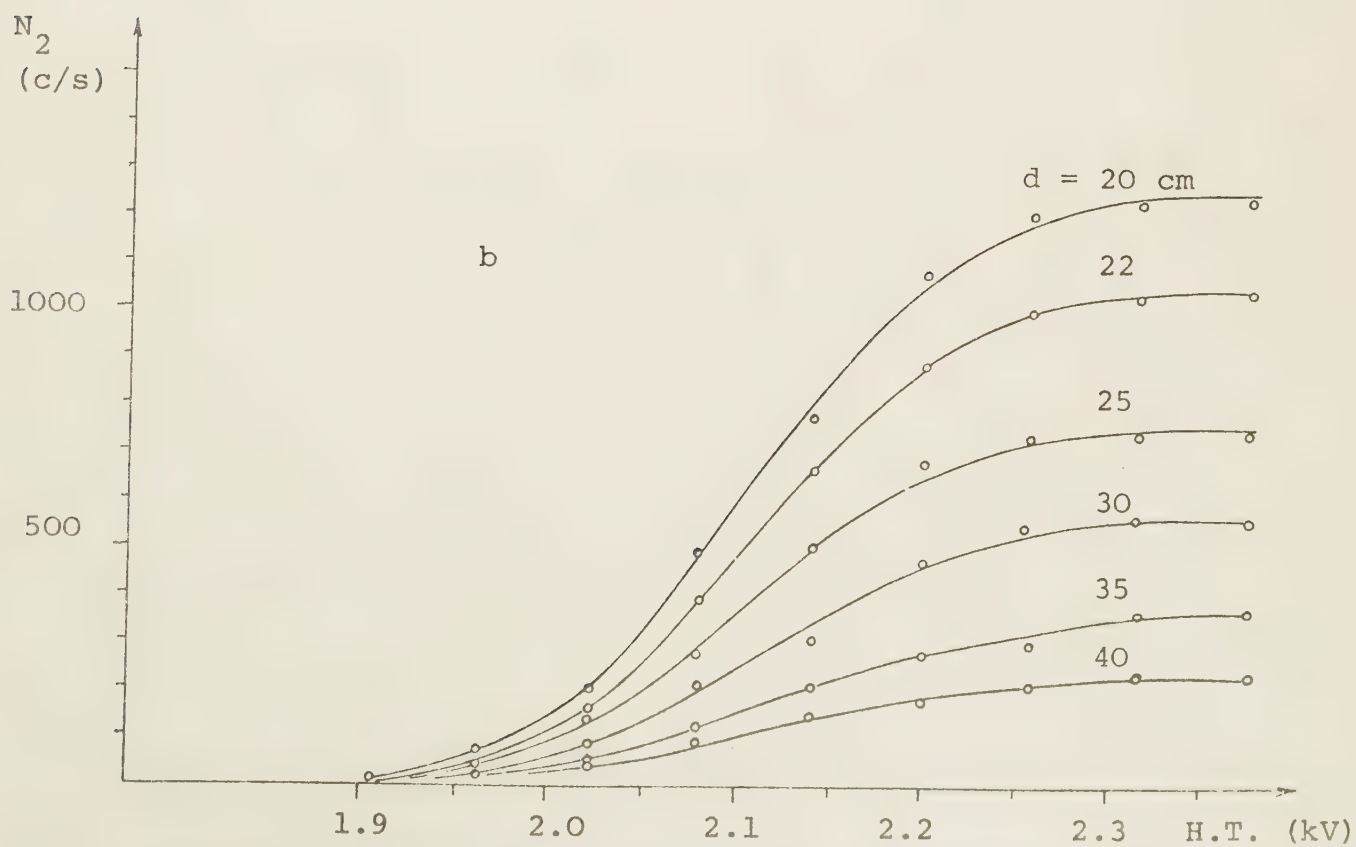
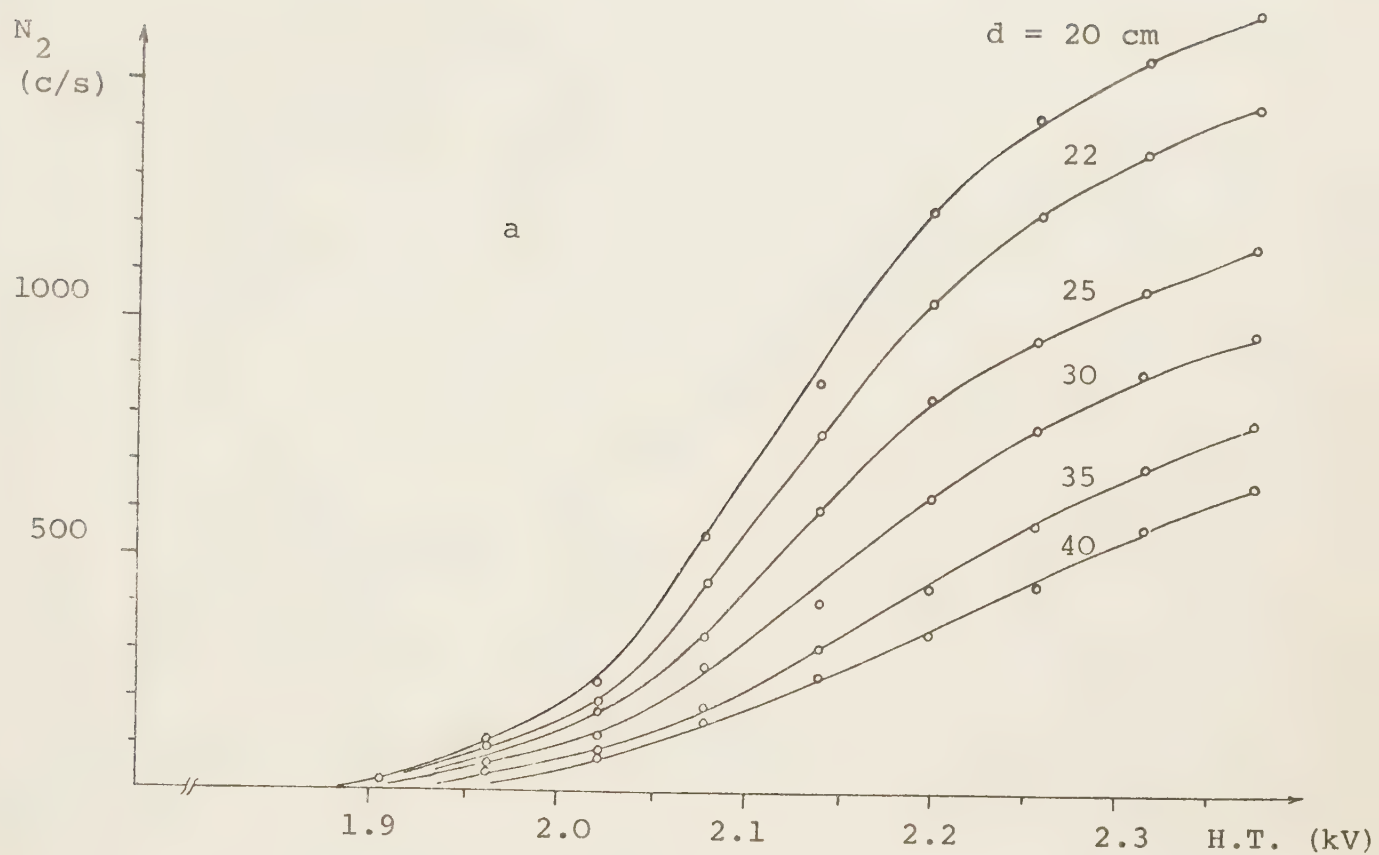


Fig. 7.6. Famille de "plateaux" du photomultiplicateur PM2 pour différentes distances de la source
a) avec bruit de fond
b) sans bruit de fond

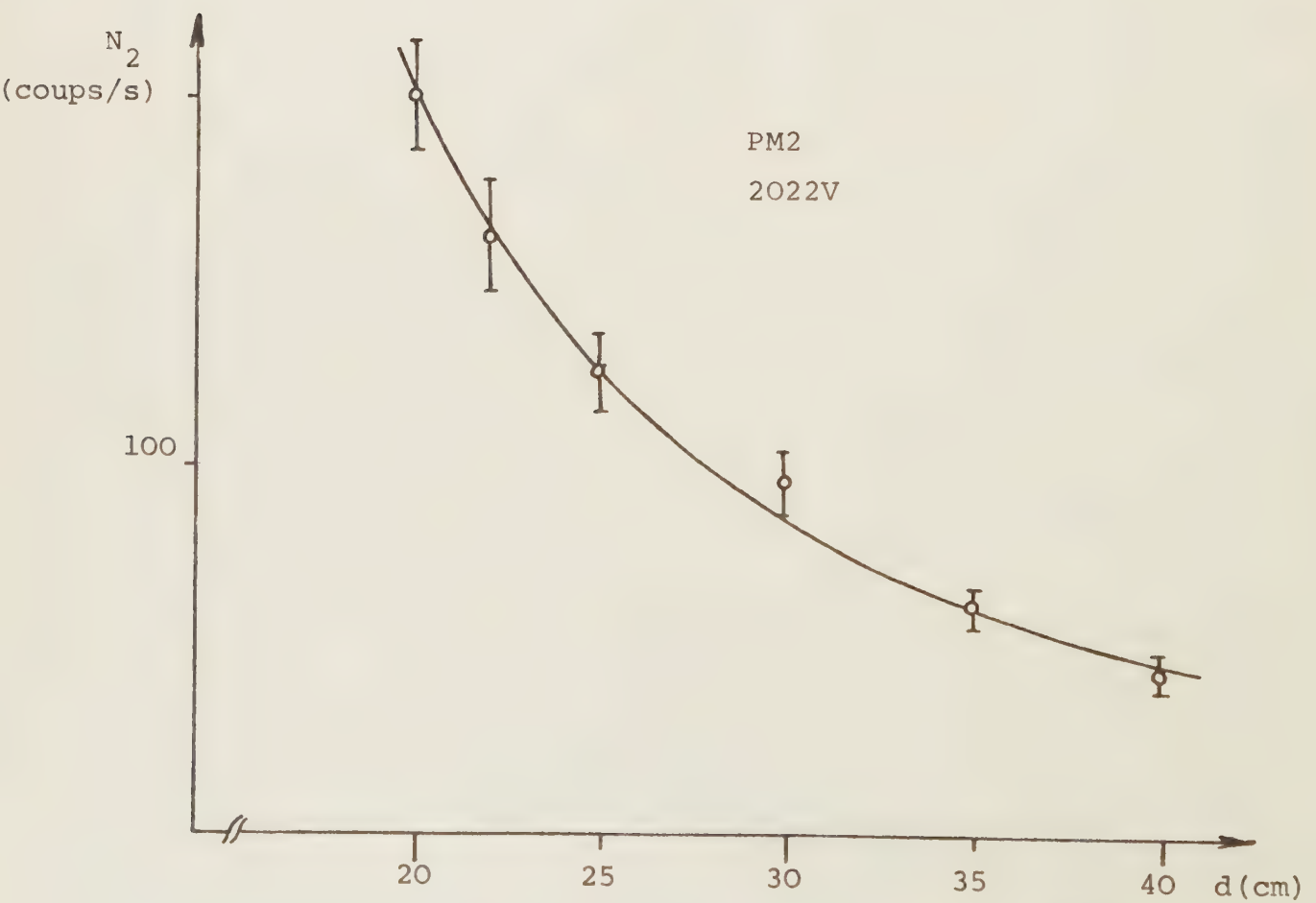
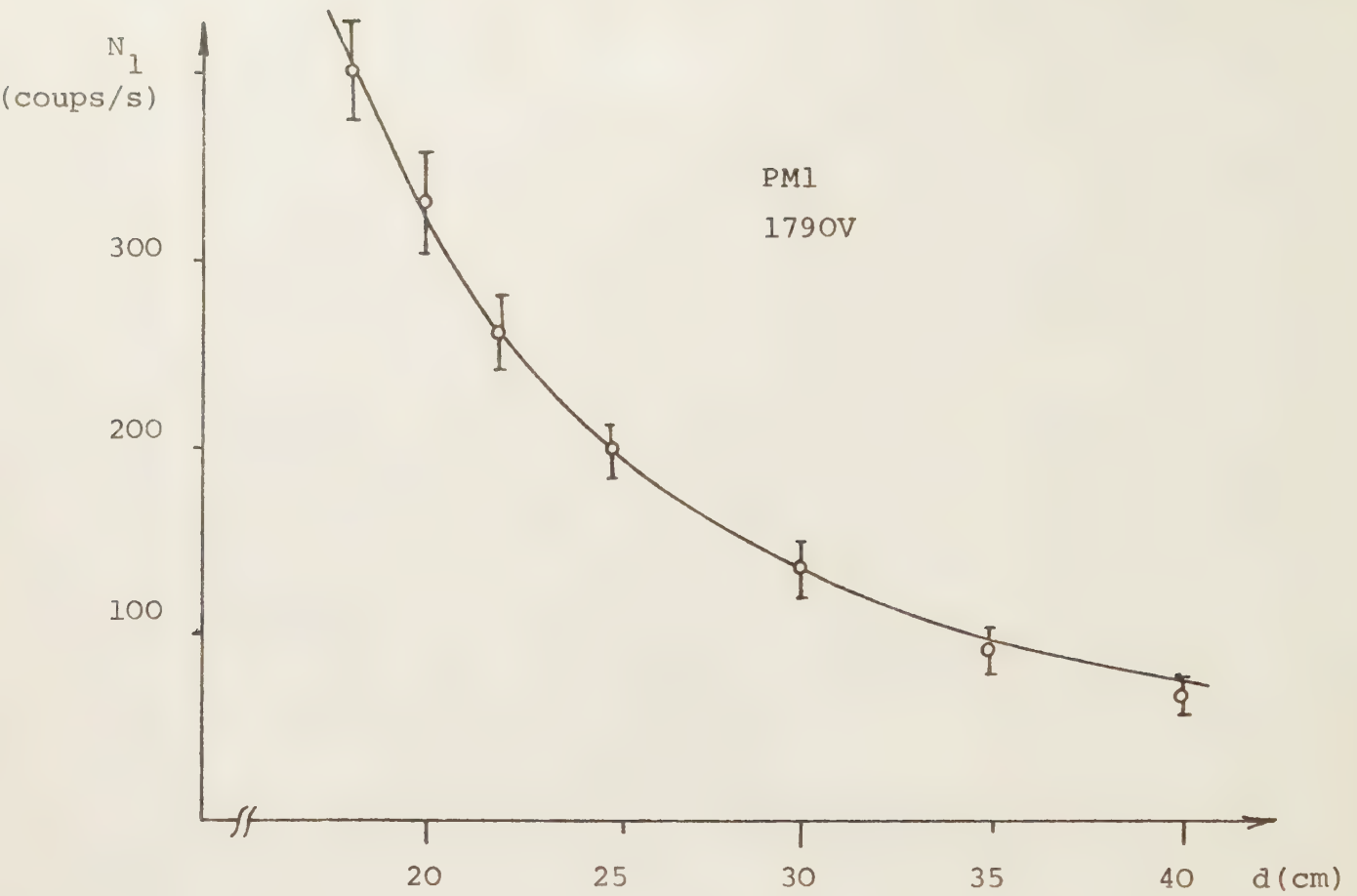


Fig. 7.7. Comptage simple en fonction de la distance d pour une tension donnée : points mesurés et courbes calculées.

Pour la mesure de coïncidence, par contre, une grande partie du bruit de fond est éliminée en raison des petits angles solides et du faible temps de résolution. C'est ce que montre la fig. 7.8 qui reproduit une courbe en "plateau" de N_c ($\theta = 180^\circ$) relevée en fonction de la tension du photomultiplicateur PM1 et pour PM2 à 2000 V.

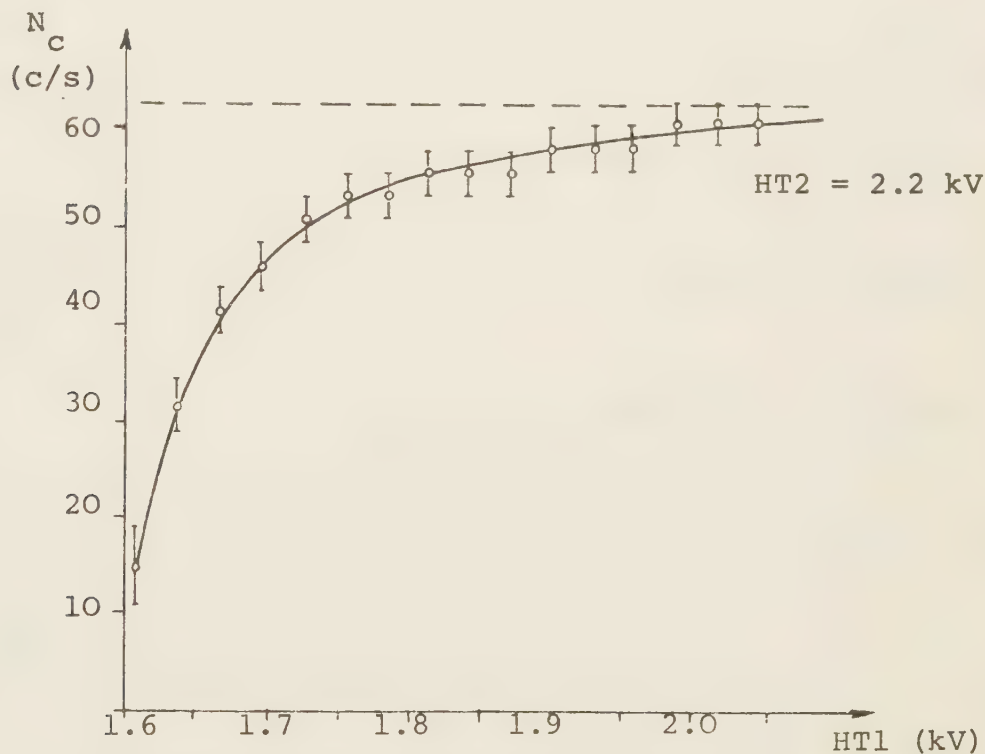


Fig. 7.8. Caractéristique $N_c(\theta = 180^\circ)$ en fonction de la tension de PM1, PM2 étant fixe.

On a donc intérêt à faire les mesures avec des tensions plus élevées de façon à avoir un taux de comptage des γ de 0.511 MeV suffisant.

Nous avons choisi :

PM1 : 1945 V

PM2 : 2150 V

Remarque : si l'on ne dispose pas de courbes d'étalonnage pour les photomultiplicateurs, le point de fonctionnement est choisi (cf. chap. 5) en faisant tout d'abord le relevé d'un "plateau" (programme PLATO) avec un signal de diode ajusté à l'énergie de la source soit, dans notre cas, $U_{\text{diode}} \approx 9$ V. On fixe la tension au milieu de la partie plate de la caractéristique ou à une valeur donnée de l'efficacité de comptage. Si la courbe ne présente pas de plateau distinct, la comparaison des mesures avec et sans bruit de fond pour une fréquence des impulsions de diode ajustée au taux de comptage attendu, est déterminante comme nous l'avons vu plus haut.

7.5. Mesure de la coïncidence $N_c(\theta)$

Une fois les points de fonctionnement des photomultiplicateurs fixés, le réglage des retards est réalisé comme indiqué au chapitre 6 (§ 6.2) au moyen du programme COIND. Enfin, le relevé de la courbe de coïncidence N_c en fonction de l'angle θ se fait avec le programme COINS dont l'organigramme est reproduit à la figure 7.9.

Il faut de 5 à 20 s par point de mesure suivant la distance de la source (c'est-à-dire l'angle solide présenté par les détecteurs) pour le comptage ; 12 à 20 points de mesure sont nécessaires pour avoir une définition du $\frac{1}{2}$ degré, respectivement du $\frac{1}{4}$ degré avec $d = 20$ cm.

Programme d'exécution:

COINS

Sous-programmes de base

utilisés:

TEMPS : 1 fois

BETA : 2

CONDE : 2

GAMA : n

GRAF : 1

CHANG : 1

n = nombre de points de mesure

$$= \text{angle } \frac{\text{max-min}}{\text{inc}} + 1$$

* 0 = pas de changement

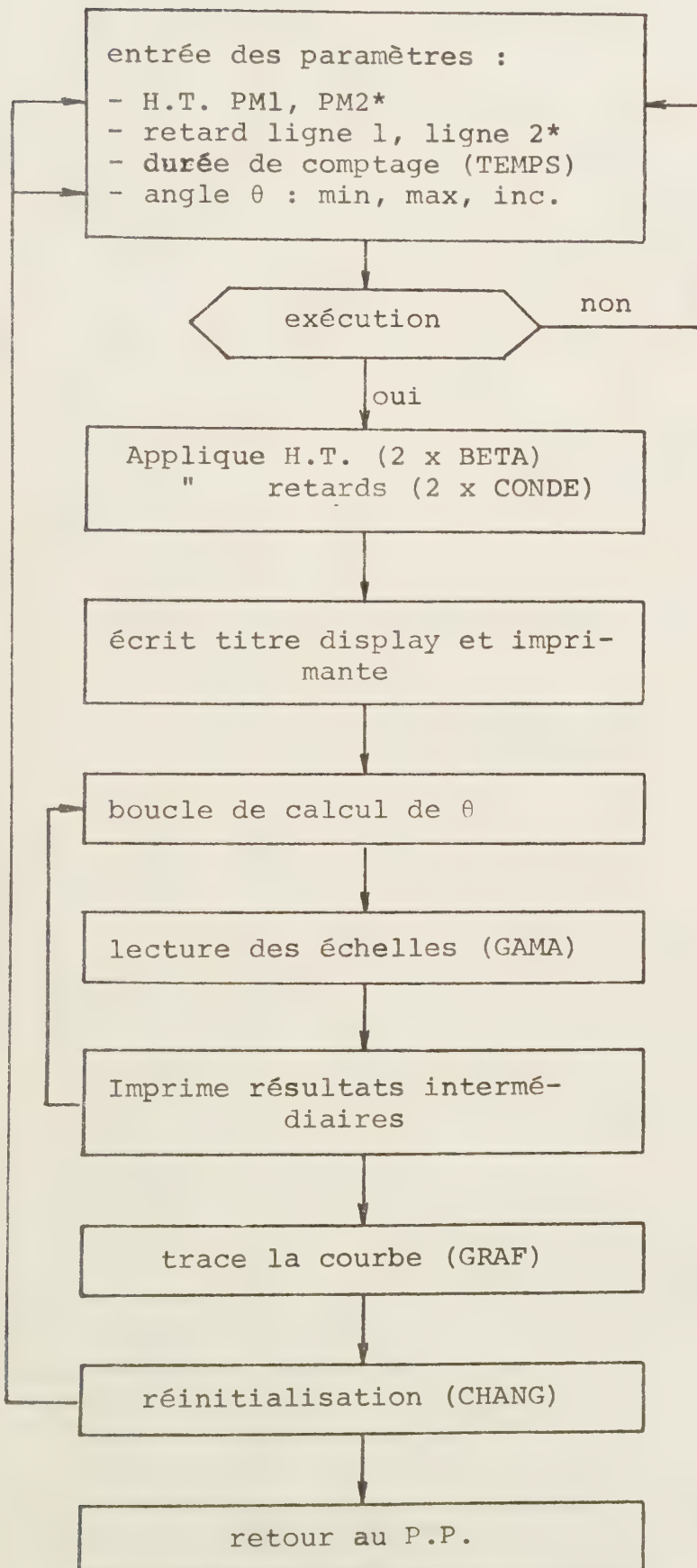


Fig. 6.9. Organigramme du relevé de la courbe de coïncidence $N_c(\theta)$

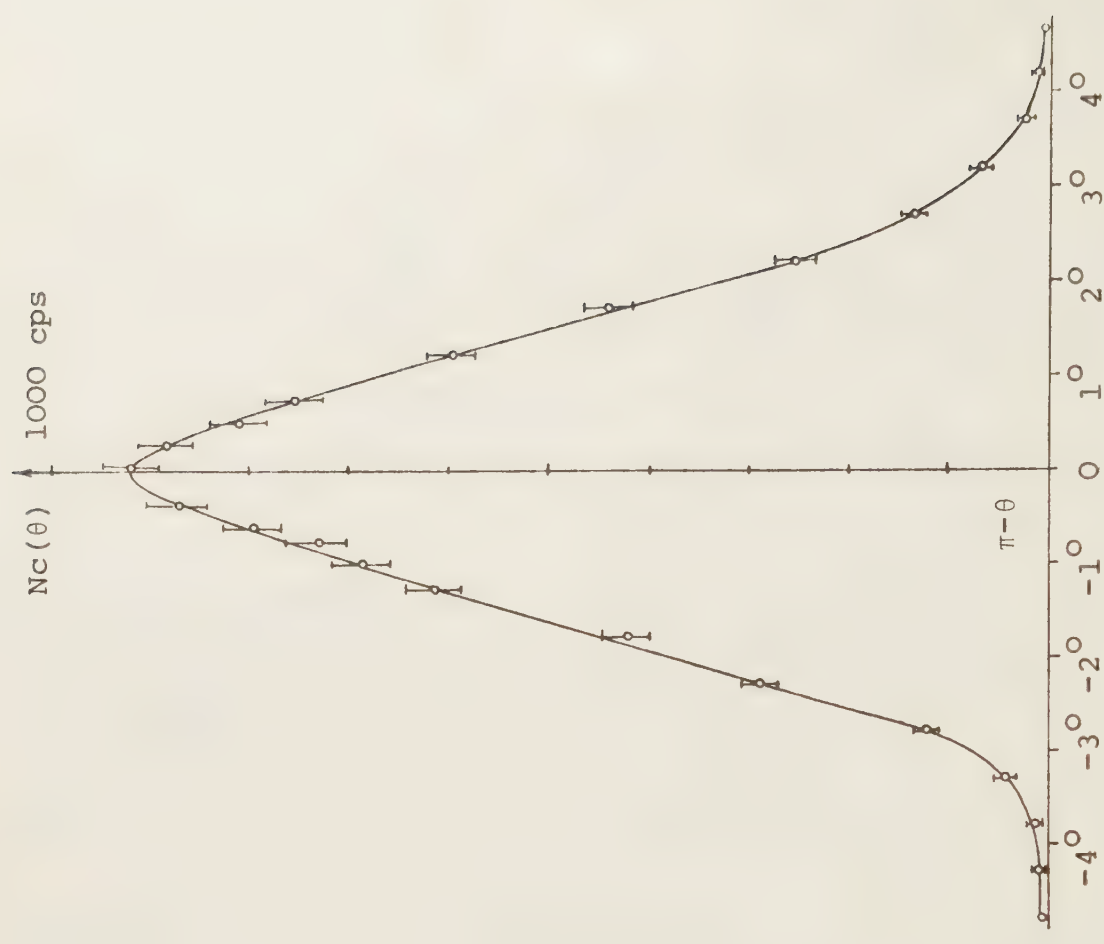


Fig. 7.10 Courbe de coïncidence N_c en fonction de l'angle θ entre les deux détecteurs: distance source $d = 20$ cm, durée de comptage 15 s.

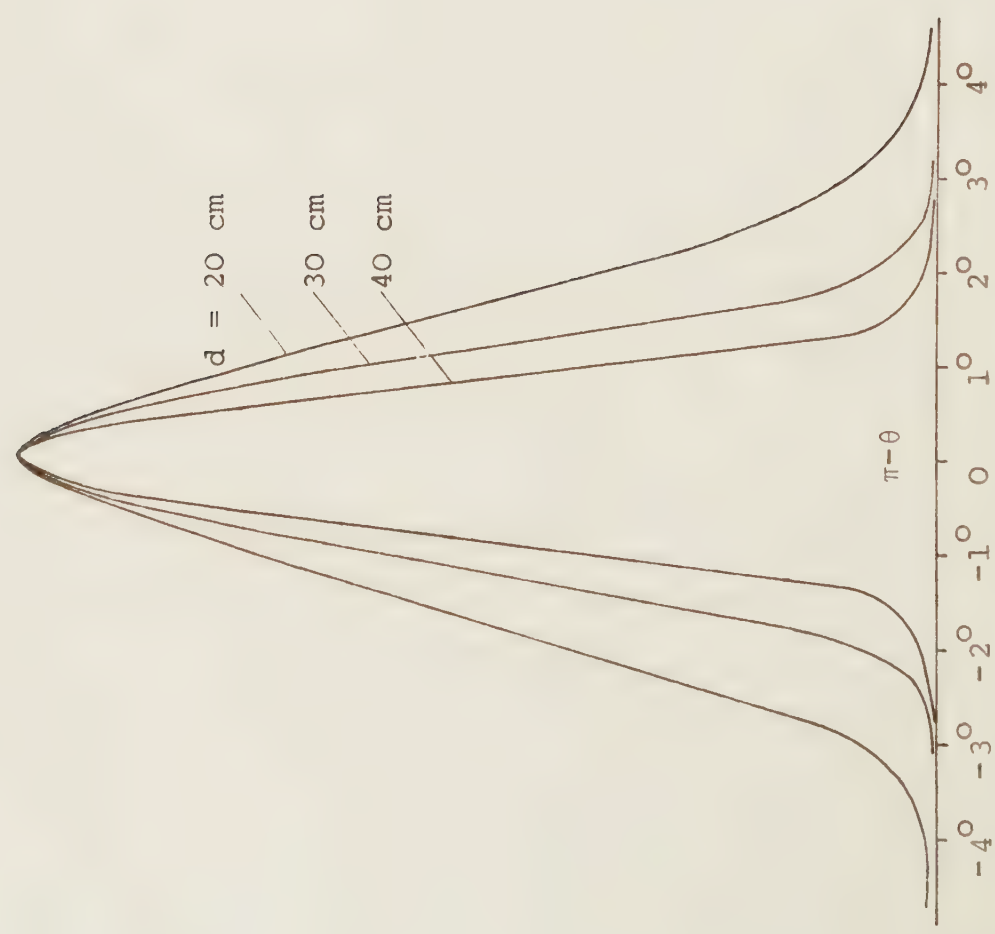


Fig. 7.11 Courbes de coïncidence pour différentes distances d ; l'amplitude est normalisée à la valeur maximum.

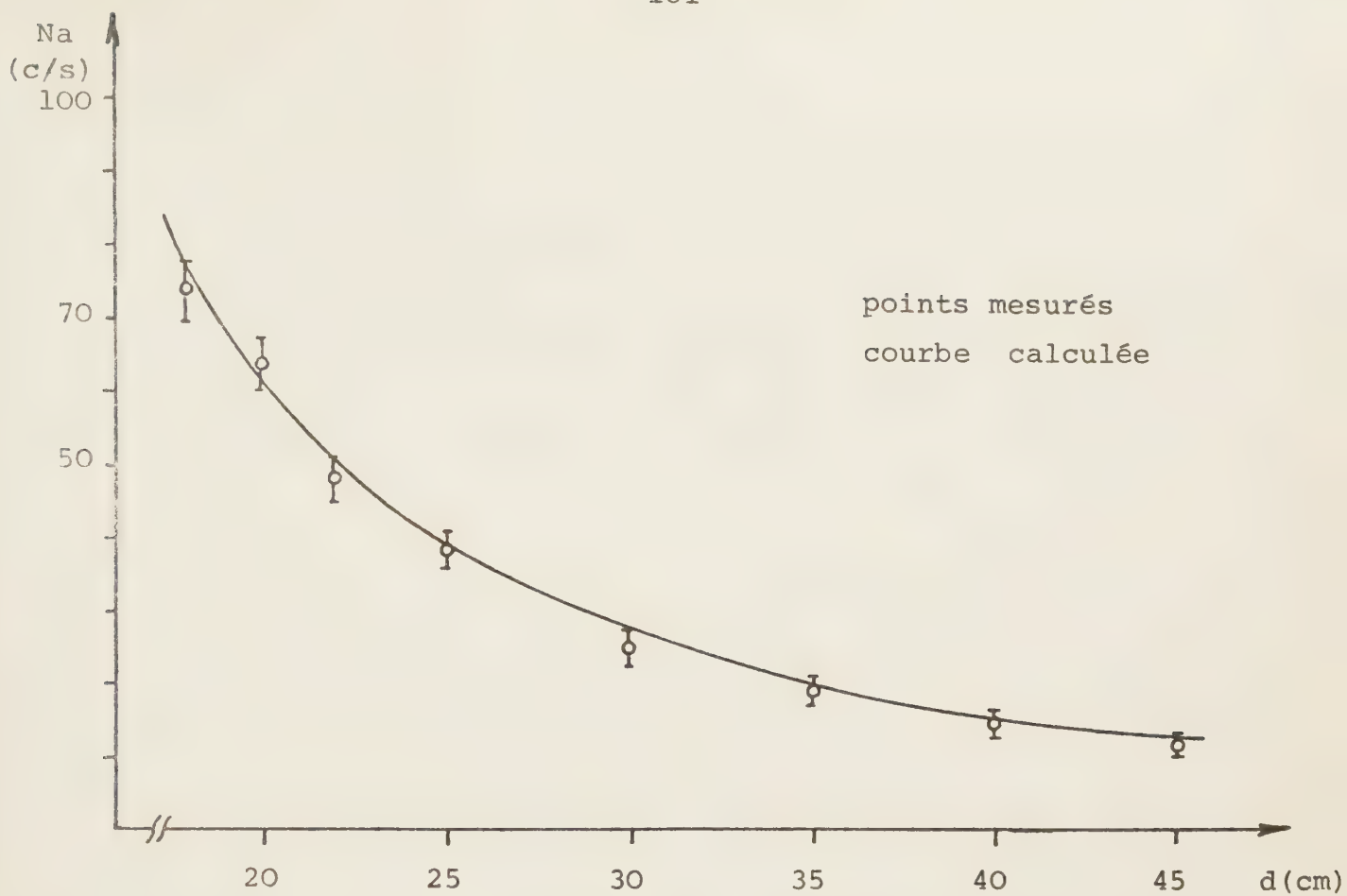


Fig. 7.12 Coïncidence max. en fonction de la distance d de la source.

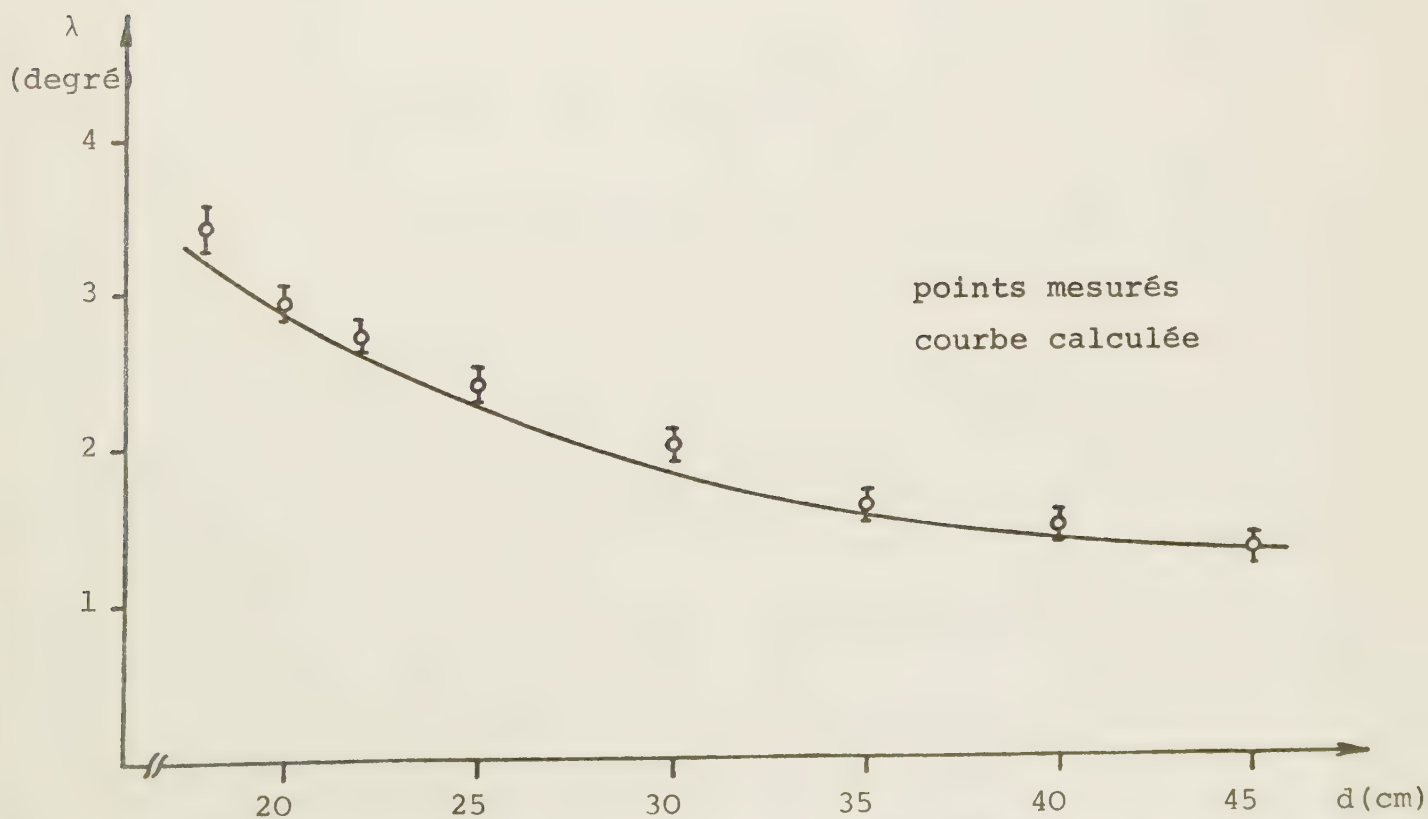


Fig. 7.13 Largeur à mi-hauteur de la courbe de coïncidence, en fonction de la distance d de la source.

7.6. Résultats obtenus :

La figure 7.10 reproduit la courbe $N_c(\theta)$ relevée avec la source à 20 cm, tandis que la figure 7.11 permet de comparer les caractéristiques relevées avec la source respectivement à 20, 30 et 40 cm, les courbes étant normées par rapport à $N_c(180^\circ)$.

D'autre part, la figure 7.12 montre un bon accord entre la décroissance de l'amplitude max. mesurée en fonction de la distance et de l'allure prévue en d^{-2} , tandis que la figure 7.13 fait apparaître une largeur de caractéristique à mi-hauteur légèrement plus grande que la valeur calculée tout en satisfaisant la loi de décroissance en $\arctg. 1/d$.

Calcul des efficacités :

L'activité nominale de la source est

$$N_{O \text{ nom.}} = 3.7 \cdot 10^5 + 25\% \text{ dés./s}$$

(les mesures ont été faites 1 mois après réception de la source, soit avec une baisse de l'activité < 3%)

A partir des expressions (7.2) à (7.7) du § 7.2 et des valeurs de N_1 , N_2 , N_c et N_f mesurées, nous pouvons déduire celles des efficacités ρ et ρ' des détecteurs pour les points de fonctionnement choisis d'après (7.2) et (7.6) : $N_1 = N_O \omega \rho_1 (1.8 + \alpha)$

$$\text{d'où : } \rho_1 = \frac{1}{(1.8 + \alpha)} \frac{N_1}{N_O \omega} \quad (7.16)$$

$$\text{de même : } \rho_2 = \frac{1}{(1.8 + \alpha)} \frac{N_2}{N_O \omega} \quad (7.17)$$

$$\text{d'où :} \quad N_a = \frac{1.8}{(1.8 + \alpha)^2} \frac{N_1 N_2}{N_o \omega} \quad (7.18)$$

$$\text{ou bien :} \quad N_o = \frac{1.8}{(1.8 + \alpha)^2} \frac{1}{\omega} \frac{N_1 N_2}{N_a} \quad (7.19)$$

Or, pour $d = 20$ cm. nous avons mesuré :

$$N_f = N_c \ (\theta \neq 180^\circ) = 0.37 \text{ c/s}$$

$$N_a \approx N_c \ (\theta = 180^\circ) = 74 \text{ c/s}$$

$$N_1 = 775 \text{ c/s}$$

$$N_2 = 860 \text{ c/s}$$

$$\text{D'autre part } \omega \ (d = 20 \text{ cm}) = 2.2 \cdot 10^{-3}$$

Ce qui donne : d'après (7.7) :

$$\alpha = \frac{1}{\omega} \frac{N_f}{N_a} = 2.27$$

$$\text{d'où :} \quad N_o = 4.45 \cdot 10^5 \text{ dés./s}$$

Cette valeur dépasse de 20 % la valeur nominale, mais reste dans la marge de tolérance de + 25 %.

$$N_o \omega = 979 \text{ dés./s}$$

$$\begin{array}{ll} \text{d'où :} & \rho_1 = 0.19 \qquad \rho'_1 = \alpha \rho_1 = 0.43 \\ & \rho_2 = 0.22 \qquad \rho'_2 = \alpha \rho_2 = 0.49 \end{array}$$

Si l'on tient compte des coefficients d'absorption des γ dans les scintillateurs, les efficacités de comptage des interactions sont respectivement :

$$\text{pour les } \gamma \text{ de } 0.511 \text{ MeV : } \epsilon_1 = \rho_1/0.58 = 0.33; \epsilon_2 = \rho_2/0.58 = 0.37$$

$$\text{" " " " } 1.28 \text{ MeV : } \epsilon'_1 = \rho'_1/0.44 = 0.98; \epsilon'_2 = \rho'_2/0.44 = 1.11$$

Ce qui correspond à ce que l'on pouvait attendre compte tenu de la valeur élevée des hautes tensions.

7.7. Discussion de la méthode

Plutôt que sur la recherche de résultats physiques, notre effort a porté sur la méthode de commande d'une telle expérience.

D'une manière générale, la machine à écrire est réservée au dialogue physicien, ordinateur, les résultats des mesures apparaissant de préférence soit sur l'imprimante (tableaux de valeurs), soit sur l'écran de visualisation (tableaux ou courbes) comme indiqué au chapitre 5 (fig. 5.7). Ceci permet d'avoir une vue claire du déroulement de la commande.

La figure 7.14 reproduit un exemple de dialogue entre le physicien et l'ordinateur, pour la commande de l'expérience, tel qu'il se présente sur la machine à écrire. On voit apparaître les différentes options de programmes au choix de l'utilisateur, puis une fois l'option choisie les demandes de données et enfin, après d'éventuelles remarques d'exécution (p. ex. valeur de HT ou de retard appliqués), la demande de répétition du même programme avec possibilité de changer les paramètres d'entrée avant de redonner le choix d'un nouveau programme.

La procédure de demande de programme, d'entrée de paramètres et de fin de programme est identique pour chacun d'eux. En effet, chacun de ces programmes est écrit selon une même structure comme on a pu le voir sur les organigrammes des figures 5.6, 6.8 et 7.9 respectivement des relevés

COMMENTAIRE ORDINATEUR OPERATEUR REMARQUES

LE 0.00.74 A 13.263	ADC	nom du p.p.
QUE VEUX-TU?		
***** ADC *****		
TAPE LA DATE DANS JJMM	0103	
LE 1.03.74 A 13.273		
[0 = FIN		
1 = PLATEAU PM		
2 = AJUSTEMENT HT (1)		
3 = COINCIDENCE DIODES		
4 = COINCIDENCE SOURCE		
5 = AUTRES (2)	1	
ATTENUATION DIODE EN DB	0	
LIMITES PLATEAU : E1, E2, E3	98	
	102	
	150	
	1500	
	2300	
	60	
H.T. : MAX, MIN, INC		RELEVE PLATEAU PM1
DUREE DE COMPTAGE EN SEC	1	
NUMERO PM	1	
EXECUTION : 0 = OUI, 1 = NON	0	
H.T. = 1945 V APPLIQUEE		
CHANGT PARAM.: 0 = OK, 1 = TOUS, 2 = PARTIE		
PM NUMERO	2	
EXECUTION : 0 = OUI, 1 = NON	2	
HT = 2150 V APPLIQUEE	0	
		RELEVE PLATEAU PM2

CHANGT PARAM. : 0 = OK, 1 1 = TOUS, 2 = PARTIE	0	
[0 = FIN : : :]	3	
HT PM1, PM2 EN VOLTS ; 0 = IDEM	0	
DUREE DE COMPTAGE EN SEC	0	
RETARD LIGNE 2 NSEC	1	
RETARD LIGNE 1 : MIN, MAX, INC.	50	REGLAGE RETARD
	35	
	65	
	2	
RETARD LIGNE 1 51 NSEC APPLIQUE		
CHANGT PARAM. : 0 = OK, 1 = TOUS, 2 = PARTIE	0	
[0 = FIN : : :]		
HT PM1, PM2 EN VOLTS ; 0 = IDEM	4	
RETARD LIGNE 2, LIGNE 1 ; 0 = IDEM	0	
DUREE DE COMPTAGE EN SEC	0	
ANGLE : MIN, MAX, INC	10	RELEVE COURBE DE COINCIDENCE
	175	
	185	
	0.5	
CHANGT PARAM : 0 = OK, 1 = TOUS, 2 = PARTIE	0	
***** FIN ADC *****		

(1) AJUST : COMPOSE DE EPSI ET BETA; SERT A FIXER LA H.T.
POUR UNE EFFICACITE DONNEE; NE PEUT ETRE UTILISE QU'APRES
LE RELEVÉ DE PLATEAU DONT IL UTILISE LES RESULTATS

(2) AUTRES = PLATA, VADEL, ETC...

Fig. 7.10 Exemple de dialogue : ordinateur/opérateur pour la mesure de coïncidence

de plateau (PLATE), réglage de retard (COIND) et mesure de coïncidence en fonction de l'angle (COINS).

Le choix de l'ordre d'entrée des paramètres au début du programme PLATE permet de répéter le relevé de plateau pour le deuxième photomultiplicateur avec les mêmes conditions que le premier en ne tapant qu'un seul paramètre (le numéro du PM) au lieu des 9 nécessaires à la première initialisation.

D'autre part, les temps de réglage sont respectivement de l'ordre de 15 secondes pour chacun des plateaux de photomultiplicateurs avec diode et l'application de la haute tension au point de fonctionnement et de 15 secondes également pour le réglage du retard entre les deux voies de mesure. Il faut compter environ 2 minutes pour l'ensemble des commandes de programmes au clavier, soit de l'ordre de 3 minutes pour le réglage complet de l'expérience. Cette performance est intéressante car elle n'implique que des programmes standards et pouvant servir à d'autres types d'expériences.

8. CONCLUSION

Les tentatives de commande d'éléments d'expériences simples comme la recherche du point de fonctionnement de photomultiplicateur ou le réglage d'un retard ainsi que leur application dans le cadre d'une expérience typique très classique comme la mesure de coïncidence de 2 γ d'annihilation, ont montré qu'il est très intéressant de pousser la modularisation des programmes jusqu'au niveau de la commande du module physique ou de la fonction, d'autant plus que le système CAMAC met à disposition tout le "hardware" nécessaire. La commande d'une expérience se réduit à quelques manipulations très simples et les mesures peuvent facilement être répétées avec des conditions différentes.

Le contrôle de l'expérience reste entièrement aux mains du physicien qui choisit les options et décide, selon les résultats obtenus, de la marche à suivre pour obtenir le fonctionnement optimum de l'expérience.

Les programmes de base ont une structure très simple et peuvent facilement être mis au point à l'aide d'un contrôleur rudimentaire tel que, par exemple, l'unité numérique ou le contrôleur manuel de branche CAMAC décrits au chapitre 3. La mise au point des programmes complets par l'ordinateur ne pose en général pas de problèmes du fait de la standardisation des programmes.

Du point de vue de l'occupation mémoire, le gain est évident. Quant au temps d'exécution, la perte est minime en

général en regard des contraintes "hardware" (temps de réponse de certaines commandes). Cependant, un gain appréciable peut être obtenu, tant pour l'occupation mémoire que pour le temps d'exécution, en écrivant les programmes de base en langage assembleur. Ceci est facilement réalisable car ces programmes sont en général courts et relativement simples.

En plus de la facilité d'écriture, la standardisation des programmes, en particulier pour le relevé de caractéristiques, permet de combiner plusieurs programmes pour obtenir toutes sortes de familles de caractéristiques en faisant varier l'un ou l'autre paramètre.

D'autre part, l'accès direct aux modules physiques par l'ordinateur met ses périphériques au service de l'instrumentation ; en effet, la caractéristique d'un équipement (par ex. photomultiplicateur) est obtenue automatiquement et rapidement par exemple sous forme d'une courbe affichée sur un écran.

Ce travail n'a pas la prétention de donner une solution définitive à tout problème de commande, mais plutôt de montrer l'avantage d'une démarche souple et d'un standard dans lequel peut s'inclure n'importe quel type de commande. Le modèle de structure de programme que nous avons défini satisfait à ces exigences.

Annexe : Système CAMAC : résumé

Nous nous bornons ici à donner un résumé des notions nécessaires à la compréhension du texte. Pour plus de détails, il suffit de se reporter aux publications mentionnées.

1. Origine et définition

CAMAC est le nom donné à des normes établies à l'origine sous les auspices du comité ESONE (qui réunit des experts de différents laboratoires et instituts européens de physique nucléaire), puis en collaboration avec le comité NIM (analogue USA).

Ces normes définissent un schéma standard pour l'interfaçage entre l'ordinateur et les éléments de mesure ou de commande dans les systèmes en ligne.

Les différentes spécifications sont diffusées par l'Office central de vente des Communautés européennes à Luxembourg. Elles se composent des documents suivants :

- EUR 4100 e : comprend les normes sur les dimensions mécaniques et sur les caractéristiques des signaux qui sont nécessaires pour assurer la compatibilité entre les éléments développés dans des laboratoires différents. Il définit également la communication entre les modules et le contrôleur de baie "crate controller" = c.c.) à l'intérieur d'une baie CAMAC ("dataway").
- EUR 4600 e : définit la communication entre les contrôleurs de baie d'une branche (une branche = 7 baies CAMAC) et le

contrôleur de système ou ordinateur ("branche highway"). Un contrôleur de baie standard type A est spécifié.

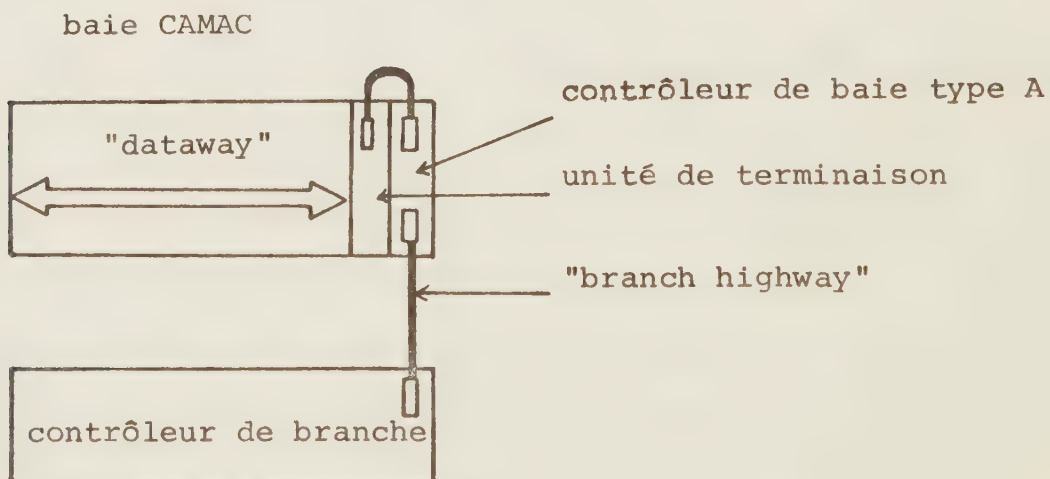
- EDWG 25/73 : est un projet de publication pour définir la communication série ("serial highway").
- EUR 5100 e : définit les caractéristiques des signaux analogiques.

Des spécifications concernant la programmation ("CAMAC software") sont actuellement en cours d'élaboration.

2. Configuration générale

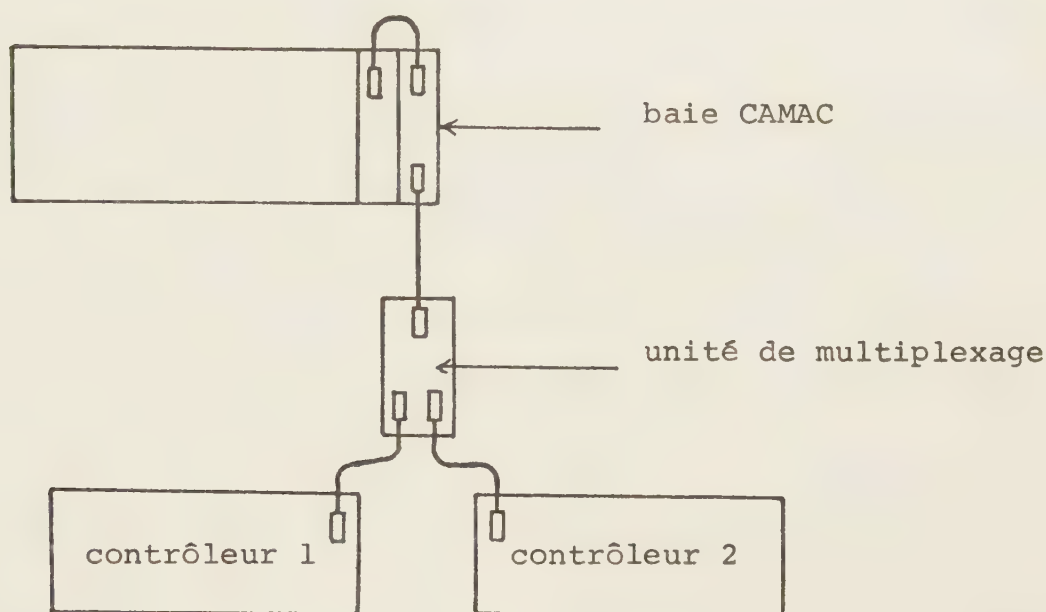
Nous avons utilisé les configurations suivantes

2.1. Avec un seul contrôleur de branche :



Le contrôleur de branche étant ou l'ordinateur IBM 1800 avec son interface, ou l'Unité numérique, ou le contrôleur manuel de branche décrit au chapitre 3.

2.2. Avec deux contrôleurs de branche en parallèle



Le contrôleur 1 étant l'ordinateur avec son interface,
le contrôleur 2 un contrôleur manuel

3. "Dataway"

Les dimensions mécaniques permettent de loger et alimenter les modules NIM dans une baie CAMAC en utilisant un raccord spécial entre le connecteur arrière du module et celui du "dataway" CAMAC.

D'autre part, les signaux de logique rapide en provenance de l'expérience (en général accès sur le panneau avant du module) sont identiques aux signaux NIM.

Les signaux pour la communication CAMAC sont transmis par un connecteur arrière du module aux 86 lignes omnibus de la baie qui constituent le "dataway". Les niveaux sont TTL

en collecteur ouvert pour la commande en parallèle de tous les modules ; les signaux sont en logique négative.

Les ordres CAMAC ont la forme NAF où

N = position du module ($1 \leq N \leq 24$; décodé dans le contrôleur de baie et envoyé sur une ligne individuelle pour chaque module soit 24 lignes en tout)

A = sous-adresse à l'intérieur du module ($0 \leq A \leq 15$; codé binaire sur 4 lignes)

F = fonction à effectuer selon un code ($0 \leq F \leq 31$; codé binaire sur 5 lignes).

Les données sont transmises sur 24 lignes R pour la lecture du module (module $\rightarrow$ c.c.) et sur 24 lignes W pour l'écriture dans le module (c.c. $\rightarrow$ module).

Un certain nombre de lignes sont encore utilisées pour :

- des indications d'état : appel (L; ligne individuelle pour chaque module), occupation (B), réponses (X,Q).
- des commandes générales: initialisation (Z), inhibition (I), remise à zéro (C).

Deux lignes servent à transmettre des signaux d'échantillonnage (S1 et S2) durant lesquels les ordres sont exécutés.

4. La branche CAMAC ("branch highway")

Elle relie le contrôleur du système (ordinateur ou autre) à un nombre de baies allant à 1 à 7. Pour plus de 7 baies à commander, il faut plusieurs branches reliées au contrôleur général via des modules de multiplexage.

Chaque branche aboutit à une unité de terminaison qui assure les niveaux de tension sur les lignes.

La branche comprend 65 paires de fils torsadés pour 65 signaux et leur ligne de retour individuelle.

La branche comprend, outre les signaux définis dans le "dataway" :

- les adresses des baies : BCR (7 lignes individuelles)
- des lignes pour les signaux de synchronisation soit 1 ligne BTA commandée par le contrôleur du système et 7 lignes BTB pour les réponses des baies.
- deux lignes BD et BG pour le traitement des appels L des modules.

Les lignes R et W du dataway sont confondues en 24 lignes R/W bidirectionnelles qui servent également à la transmission des appels L des modules.

REFERENCES

- (1) Les ordinateurs du CERN, cahier technique n^o 9, p. 25, août 1973, CERN, Genève.
- (2) CAMAC: Système d'instrumentation modulaire pour le traitement des informations, EUR 4100 e, EURATOM, Luxembourg.
- (3) A.E.C. - N.I.M. committee. NBS Publication NC-524 Rev.A, Washington D.C., 1966.
- (4) D. Maeder et M. Sabev-Galé, Système de circuits logiques avec affichage et commande en vue d'une télécommande par ordinateur, Proc. Colloque int. élec. nucl., 1, Versailles 1968.
- (5) CLR/A: circuits logiques rapides, série A, développés à l'Université de Genève et décrits dans:
D. Maeder, Proc. ITNPA Monterey conf., paper 1 Nat. Acad. of Sc. Series Rep. Nr. 40, p. 325, 1963.
- (6) CAMAC OPTIONS, CERN-NP, CAMAC Note 1-00, p.6., dec. 68
- (7) P. Lecomte, Etude d'un système de test pour photomultiplieurs, travail de diplôme, DPNC, Genève, 1967.
- (8) D. Maeder, M. Sabev-Galé, J.P. Vittet: unité de commande manuelle pour système CAMAC, HPA Vol. 43, p.448, 1970.
- (9) M. Martin et al., Energy dependence of the quasi two-body reactions, Proposal to the SPSC, CERN/SPSC/74-31, SPSC/P11, March 7, 1974.
- (10) CAMAC bulletins, Commission des Communautés Européennes, Luxembourg (paraît 3 fois par an depuis juillet 71).
- (11) Proc. Symposium CAMAC, suppl.bull.CAMAC No.9, avril 1974
- (12) Tubes P.M. à réponse rapide, publication RTC, Paris, 1968
- (13) E. Breitenberger, Scintillation spectrometer statistics, Prog. Nucl. Phys., 4, 56-94, 1955.
- (14) C. Kittel, Introduction à la physique de l'état solide, chap. 10, Dunod, Paris, 1958.

